

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Ciências
ULisboa

**Caracterização e modelação de reservatórios carbonatados:
estudo de caso baseado em análogos do Jurássico Médio da
região de Vale Florido, Maciço Calcário Estremenho (MCE)**

Mestrado em Geologia

(Especialização: Estratigrafia, Sedimentologia e Paleontologia)

Joana Albuquerque Sacadura Lemos Ferreira

Dissertação orientada por:

Professora Doutora Ana Cristina Costa Neves dos Santos Azerêdo

Dr. Paulo José Saraiva Bizarro

2016

“Carbonates are Born not Made”

Noel P. James

“Imagination will often carry us to worlds that never were. But without it we go nowhere.”

Carl Sagan

Agradecimentos

“In matters of science, curiosity gratified begets not indolence, but new desires.”

James Hutton

Chega ao fim mais uma etapa académica, uma etapa cheia de desafios e contratempos, que me fez crescer e aprender mais e persistir, sempre!

A todos os que nunca me deixaram desistir e à vontade de querer sempre saber mais.

À Professora Ana Cristina Azerêdo, pelo apoio incondicional, orientação académica e compreensão, indispensáveis para este trabalho.

À Partex Oil & Gas pela colaboração neste estudo, pela cedência de um espaço de trabalho e do *software* de modelação (Petrel 2014 E&P) sem o qual não poderia ter realizado este trabalho.

Ao Dr. Paulo Bizarro (Partex Oil & Gas) pela disponibilidade em ajudar e co-orientar a minha dissertação. À Dra. Teresa Ribeiro (Partex Oil & Gas) pela oportunidade de realizar esta tese em colaboração com a Partex. À Engenheira Ana de Sousa, por (Partex Oil & Gas) ter sido a minha Professora de Petrel, e por ter tido a paciência de me explicar como resolver as minhas dúvidas na modelação. Ao Nuno Inês (Partex Oil & Gas) por todos os conselhos e por fazer as perguntas que me deixavam sempre a pensar. E a todas as pessoas da Partex que me acolheram e me fizeram sentir em casa.

Ao Departamento de Geologia da FCUL, por me permitir realizar esta dissertação.

Ao Professor Fernando Marques (Dep. Geologia, FCUL) por toda a ajuda e disponibilidade essencial para a realização da carotagem, e por me ter ensinado a fazer argamassa indispensável para se poder realizar este procedimento nas amostras mais pequenas. À Professora Isabel Fernandes (Dep. Geologia, FCUL) por me ter permitido assistir à sua aula, e pela revisão de conceitos que permitiram calcular as porosidades através do ensaio de saturação em água.

Ao Dr. Jorge Salgado Gomes do *Petroleum Institute* (PI), Abu Dhabi, por ter realizado os ensaios de porosidade com o porosímetro de expansão de gás Hélio e permeabilidade, sem os quais não poderia caracterizar completamente o estudo de caso.

À Cyntia Mourão por me ter ajudado com todo o restante procedimento laboratorial, corte de taliscas, impregnação com Azul Ceres e realização de lâminas delgadas indispensáveis à classificação e caracterização de todas as unidades presentes. Ao Bruno Barros pela realização das minhas últimas 5 lâminas e à Dra. Ana Isabel Janeiro por me ter cedido a chave do laboratório e a placa de aquecimento para poder preparar a solução de azul Ceres.

Ao Professor Manuel Francisco do Instituto Superior Técnico, pela disponibilidade em colaborar nos procedimentos laboratoriais para a obtenção de valores de permeabilidades, apesar de por diversos motivos técnicos não ter sido possível usufruir do equipamento do IST.

Aos meus colegas de mestrado, João e Sofia, pela paciência de ouvirem os meus queixumes... Sofia, um especial obrigado, por me emprestares as tuas redes que costuraste quase tão bem como a minha avó, e que facilitaram em muito os ensaios de saturação em água, e também na ajuda a decifrar o que alguns dos “bichos” nas minhas lâminas eram.

Aos meus amigos que são pilares na minha vida emocional, e a “Disney” da minha vida: Ju, Fi, Vemi, Su, Kate, Ricardo, João (amigos/inimigos para sempre) e Mari (a minha irmã Japonesa). Ao Ricardo um agradecimento especial por me ter ajudado a serrar os topos/bases dos meus plugs (o pânico que eu tinha de serrar os meus dedinhos no processo).

À família Coimbra por ser uma segunda família, por todo o apoio e pela boleia até ao meu afloramento.

À minha família claro, que são uns chatos de primeira, mas que são também o meu maior pilar e o meu grande apoio, que fizeram de mim quem eu sou. Aos meus avós, que são os melhores do mundo - e ao avô Zé, o verdadeiro Leão da Estrela, a quem dedico esta tese. Aos meus pais, que têm a paciência da vida, por aturarem as minhas constantes mudanças de humor, por terem sido a minha boleia milhentas vezes para o campo, e por o fazerem sem se queixarem, pelos paitrocínios e por me terem despertado e apoiado toda a minha curiosidade pelo mundo.

E ao Pedro, pelo apoio incondicional, pela paciência a par dos meus pais, de aturar as minhas mudanças de humor/mau humor e choros sem razão. Por me teres ajudado a “partir pedra” no campo, nunca teria conseguido partir aqueles blocos maiores sem ti, e também por me teres ajudado a carregar com eles de metro entre o IST e a FCUL. Por me teres ajudado com dúvidas existenciais e corrigido a minha forma de escrever. E acima de tudo por me fazeres feliz.

Resumo

O presente trabalho visou dois objectivos: i) caracterizar uma formação do Jurássico Médio na região do Vale Florido (Maciço Calcário Estremenho), como análoga de um reservatório carbonatado, analisando as unidades a diversas escalas tendo em especial atenção as litofácies, petrografia, diagénese, estratonomia, geometria dos corpos sedimentares e heterogeneidades (em especial das propriedades petrofísicas do reservatório – porosidade e permeabilidade); ii) ensaiar a conjugação da análise à escala da rocha com a construção de modelos de reservatório que prevejam a distribuição dos *geobodies* e das suas propriedades petrofísicas, contribuindo para os aferir e aperfeiçoar.

Este reservatório no seu todo tem baixa porosidade e permeabilidade, com excepções em certos intervalos, tendo sido amplamente influenciado pela diagénese. A maioria dos níveis classificam-se segundo Ahr (2008) como reservatório diagenéticos ou híbridos 1.

Observam-se três litofácies definidas por Azerêdo (1993, 1998) no afloramento do Vale Florido: litofácies 1 (L1) – calcários oolíticos (que se subdividiu neste trabalho em L1a - sem estratificação ou com estratificação planar e L1b – com estratificação grosseira de vários tipos, como seja, *ripple marks*, estratificação cruzada, etc); litofácies 2 (L2) – calcários calciclásticos e litofácies 3 (L3) – biostromas ou biolititos de corais. A litofácies com maior porosidade associada é a litofácies 1 (em especial 1b). A maior permeabilidade não se relaciona com a fácies nem com a porosidade mais comum, mas sim com determinados processos de dissolução tardia, mais especificamente conducente à dissolução ao longo de estilólitos e à criação de fracturas.

O afloramento foi dividido em sete sectores (A, B, C, D, E, F e G). Conclui-se deste estudo que os níveis com maior potencial seriam o D3 – nível oolítico com *ripple marks* e estratificação oblíqua (L1b), o F2,75 – nível oolítico com estratificação oblíqua (L1b) e o E2 – nível biostrófico (L3), observando-se porosidade de canal em todos eles, e possivelmente o nível D5 – nível biostrófico (L3), onde é possível observar em lâmina delgada poros vacuolares (porosidade *vuggy*) de dimensão razoável e que parecem conectados.

A maioria dos níveis seriam também excelentes selos, uma vez que a sua porosidade e permeabilidade são reduzidas. A geometria dos *geobodies* vista em campo, e posteriormente introduzida e extrapolada no *software* de modelação (Petrel), permite também verificar o

potencial como armadilhas estratigráficas, tendo os corpos biostrómicos muitas vezes configurações lenticulares e os corpos oolíticos variações laterais/interdigitações para níveis mais clásticos/tempestíticos, isolando-se assim os níveis com maior permeabilidade.

Palavras-chave: Vale Florido (Maciço Calcário Estremenho), reservatório carbonatado, análise multiescala, propriedades petrofísicas, modelação.

Abstract

The present work aimed at two objectives: i) characterize a Middle Jurassic formation in Vale Florido region (Maciço Calcário Estremenho) as an analogue for a carbonate reservoir, analyzing the units at different scales, with particular focus in lithofacies, petrography, diagenesis, stratonomy, geometry of sedimentary bodies and heterogeneities (especially of the petrophysical properties of the reservoir - porosity and permeability); ii) evaluate the combination of analysis at rock scale and construction of reservoir models that estimate the distribution of geobodies and their petrophysical properties, contributing to their improvement.

This reservoir as a whole has low porosity and permeability, with a few exception, having been widely influenced by diagenesis. Most levels are classified according to Ahr (2008) as diagenetic reservoir or hybrid 1.

Three lithofacies defined by Azerêdo (1993, 1998) are observed in Vale Florido outcrop: lithofacies 1 (L1) – oolitic limestones (which was divided in this work in L1a – without stratification or with planar layering and L1b – with coarse stratification of various types, such as, ripple marks, cross bedding, etc); lithofacies 2 (L2) – calciclastic limestones and lithofacies 3 (L3) – biostromes or coral biolithites. The lithofacies with higher associated porosity is lithofacies 1 (especially 1b). The highest permeability is not related to facies nor the most common porosity, but with certain late diagenetic processes, more specifically processes that lead to dissolution along stylolites and fracture creation.

The outcrop was divided into seven sectors (A, B, C, D, E, F and G). From this study it can be concluded that the levels with the greatest potential as reservoir would be the D3 – oolitic level with ripple marks and cross sets (L1b), F2,75 – oolitic level with cross bedding and E2 – biostrome level (L3), in all of which channel porosity is observed, and possibly D5 – biostrome level (L3) where one can observe, in thin section, vuggy pores of reasonable size and that seem connected.

Most levels would also be excellent seals since their porosity and permeability is low. The geometry of the geobodies seen in the outcrop, and then introduced and extrapolated in the modeling software (Petrel), also allows to verify the potential as stratigraphic traps. The

biostrome bodies often have lenticular configuration and the oolitic bodies display lateral variations/interfingering with more clastic/tempestite levels, thus isolating the levels with increased permeability.

Key-words: Vale Florido (Maciço Calcário Estremenho), carbonate reservoir, multiscale analysis, petrophysical properties, modelling.

Índice Geral

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.2. Singularidades dos carbonatos e importância económica do seu estudo	2
1.3. Sistema Petrolífero	3
1.3.1. Rocha geradora	4
1.3.2. Maturação	4
1.3.3. Migração	4
1.3.4. Selo	5
1.3.5. Armadilhas.....	5
1.3.6. Reservatório.....	5
1.3.7. Momento Crítico.....	6
1.4. Heterogeneidades em reservatórios carbonatados: desafios de estudo	6
2. A diagénese nas rochas carbonatadas.....	8
2.1. Diagénese e processos diagenéticos	8
2.1.1. Compactação	9
2.1.2. Dissolução	11
2.1.3. Cimentação	11
2.1.4. Recristalização (Neomorfismo).....	14
2.1.5. Micritização	15
2.1.6. Dolomitização/Desdolomitização.....	15
2.2. Ambientes diagenéticos carbonatados	19
2.2.1. Ambiente Meteórico	20
2.2.2. Ambiente Marinho.....	22
2.2.3. Ambiente de Soterramento	23
2.3. Fases diagenéticas: eodiagénese, mesodiagénese e telodiagénese.....	24
3. Enquadramento geográfico e geológico.....	27
3.1. Enquadramento da área de estudo.....	27

3.2. Bacia Lusitânica	28
3.2.1. Aspectos litostratigráficos e sedimentares gerais do Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (MCE)	29
3.2.2 Aspectos tectónicos do MCE.....	32
3.2.3 Formação Santo António - Candeeiros, Membro de Codaçal	33
4. Metodologia de estudo.....	39
4.1. Métodos e técnicas laboratoriais	39
4.1.1. Selecção de amostras	39
4.1.2. Tratamento laboratorial das amostras seleccionadas.....	39
4.1.3. Método do Azul Ceres	39
4.1.4. Método da determinação da porosidade relativa das rochas por saturação em água ..	41
4.1.5. Carotagem.....	42
4.1.6. Determinação da porosidade através do porosímetro por expansão de gás Hélio (He) e determinação da permeabilidade através do permeâmetro digital de gás.	43
4.2. Nomenclatura, classificações e conceitos associados à porosidade e permeabilidade ..	46
4.2.1. Classificação Composicional e Textural	46
4.2.2. Definição de porosidade e permeabilidade.....	48
4.2.3. Classificação do tipo de porosidade	50
4.2.4. Classificação da permeabilidade	51
4.2.5. Relação entre geometria, tamanho e raio dos poros e permeabilidade. Relações ϕ -k: Reservoir Rock Typing.....	52
4.2.6. Tipo de reservatórios carbonatados	54
5. Análise multiscala das unidades do Vale Florido, MCE.....	55
5.1. Observações de campo na zona do Vale Florido	55
5.2. Amostragem	59
5.2.1. Sector A	60
5.2.2 Sector B	62
5.2.3 Sector C	64
5.2.4 Sector D	64
5.2.5 Sector E.....	67
5.2.6 Sector F.....	70
5.2.7 Sector G	72
5.3. Descrição petrográfica.....	74

5.3.1. Amostra VFJ1 (Sector A – Poço A)	74
5.3.2. Amostra VFJ2 (Sector A – Poço A)	75
5.3.3. Amostra VFJ3 (Sector A – PoçoA2)	76
5.3.4. Amostra VFJ4 (Sector A – Poço A2)	77
5.3.5. Amostra VFJ5 (Sector A – Poço A)	79
5.3.6. Amostra VFJ6 (Sector A – Poço A)	80
5.3.7. Amostra VFJ7 (Sector A – Poço A)	81
5.3.8. Amostra VFJB1 (Sector B – Poço B).....	81
5.3.9. Amostra VFJB1.5 (Sector B – Poço B).....	83
5.3.10. Amostra VFJB2/B2.5 (Sector B – Poço B)	84
5.3.11. Amostra VFJB3/B3 (A) (Sector B – Poço B).....	85
5.3.12. Amostra VFJB4 (Sector B – Poço B)	86
5.3.13. Amostra VFJC1/C1 (A) (Sector C – Poço CDE)	88
5.3.14. Amostra VFJD1 (Sector D – Poço CDE)	89
5.3.15. Amostra VFJD2 (Sector D – Poço CDE)	91
5.3.16. Amostra VFJD3 (Sector D – Poço CDE)	92
5.3.17. Amostra VFJD4 (Sector D – Poço CDE)	94
5.3.18. Amostra VFJD5 (Sector D – Poço CDE)	96
5.3.19. Amostra VFJE1 (Sector E – Poço CDE)	98
5.3.20. Amostra VFJE1.5 (Sector E – Poço CDE)	100
5.3.21. Amostra VFJE2 (Sector E – Poço CDE)	101
5.3.22. Amostra VFJE2.5 (Sector E – Poço CDE)	102
5.3.23. Amostra VFJE3 (Sector E – Poço CDE)	103
5.3.24. Amostra VFJF1 (Sector F – Poço FG)	104
5.3.25. Amostra VFJF1.5 (Sector F – Poço FG2)	105
5.3.26. Amostra VFJF2/F2 (A) (Sector F – Poço FG)	106
5.3.27. Amostra VFJF2.5 (Sector F – Poço FG2)	108
5.3.28. Amostra VFJF2.75 (Sector F – Poço F3)	110
5.3.29. Amostra VFJF3/F3.5 (Sector F – Poço F3).....	111
5.3.30. Amostra VFJG1/G1.5 (Sector G – Poço FG/FG2).....	113
5.3.31. Amostra VFJG2/G2.5 (Sector G – Poço FG e FG2)	114
5.4. Resultados dos ensaios de porosidade pelo método da saturação em água	116

5.5.	Resultados dos ensaios de porosidade através do porosímetro de expansão de gás Hélio e de permeabilidade pelo permeâmetro de gás digital	117
5.6.	Porosidade versus Litofácies	118
5.7.	Tipos de poros <i>versus</i> Litofácies	119
6.	Modelação do reservatório: modelo de fácies e modelo de porosidade	120
6.1.	Metodologia de Estudo	120
6.1.1.	Alguns conceitos de profundidade em poços: TVT, MD, TVDSS	120
6.1.2.	Importação de Poços.....	121
6.1.3.	Marcadores estratigráficos (definir horizontes e zonas).....	123
6.1.4.	<i>Framework</i> dos Modelos: Criar a Malha (<i>Grid</i>), Zonas e <i>Layering</i> . <i>Upscaling</i> dos Logs (<i>Scale-up Well Logs</i>)	126
6.2.	Modelo de Fácies	131
6.3.	Modelo de Porosidade	135
6.4.	Conclusões/Síntese da Modelação	139
7.	Discussão e conclusões.....	140
7.1	Discussão dos resultados	140
7.2	Conclusões	146
8.	Bibliografia.....	148
Anexos	157

Índice de Figuras

Fig. 1.1 – Esquematização de um sistema petrolífero. Retirado de Al-Hajeri <i>et al.</i> (2009).	4
Fig. 2.1 - Processos diagenéticos e impacte destes na porosidade e permeabilidade. Retirado de Nurmi & Standen (1997).	9
Fig 2.2. Mudança na permeabilidade e propriedades capilares com a redução da porosidade resultante da oclusão dos poros nos espaços intergranulares. A porosidade intergranular de 20% presente em A é reduzida por cimentação para 7% em B . a permeabilidade é sistematicamente reduzida e a forma da curva da pressão capilar é sistematicamente mudada para reflectir poros de dimensão mais pequena. Retirado de Lucia (1999).	12
Fig. 2.3 - Tipos de <i>fabrics</i> que ocorrem em carbonatos que sofreram recristalização segundo Friedman (1965), retirada de Flügel (2004).	14
Fig. 2.4 - Oóides micritizados como microporosidade do tipo intrapartícula a) lâmina E1 do presente trabalho b) lâmina F2,5 do presente trabalho.	15
Fig. 2.5 - Classificação de <i>fabrics</i> dolomíticos (Friedman 1965 in Flügel 2004).	17
Fig. 2.6 – Cristal romboédrico que sofreu desdolomitização (lâmina F2 do presente trabalho)	18
Fig. 2.7 - Esquematização dos ambientes diagenéticos (Flügel, 2004).	19
Fig. 2.8 – Regimes diagenéticos (adaptado de Mazzullo, 2004 in Ali <i>et al.</i> 2010).	26
Fig. 2.9 – Porosidade nos carbonatos ao longo do tempo geológico. Adaptado de Akbar <i>et al.</i> 1994 in Ali <i>et al.</i> 2010.	26
Fig. 3.1 – Carta geológica e litológica do Maciço Calcário Estremenho (Manuppella <i>et al.</i> , 1985) com a localização da zona em estudo marcada a preto.	27
Fig. 3.2 – Localização geográfica do afloramento em estudo na Serra de Aire e Candeeiros, Vale Florido. Imagem retirada do Google Earth.	28
Fig. 3.3. – Diagrama regional simplificado das séries do Maciço Calcário Estremenho, do Bajociano superior ao Caloviano, mostrando a dinâmica dos padrões de fácies e a sua interpretação. Estas séries ilustram as principais fases evolutivas da rampa carbonatada que caracterizava a bacia, no Jurássico Médio (Azerêdo, 1998 redesenhado em Pimentel, 2005). Foram assinalados na imagem os depósitos em estudo.	30
Fig. 3.4 – Unidades litostratigráficas formais para o Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho. Retirado de Azerêdo (2007). Foi assinalado o membro a que pertence a secção em estudo.	31
Fig. 3.5 – Mapa geológico simplificado. Retirado de Carvalho (2013).	33
Fig. 3.6 – Representação esquemática da evolução do complexo barreira, durante o Jurássico Médio. A) Começam a desenvolver-se pequenos baixios de sedimentação mais energética, no Bajociano sup., que pronunciam o início da progradação rápida para W, de fácies de rampa interna, com nível do mar em descida relativa; B) No Batoniano inf. continua a existir progradação de barreira, mas gradualmente a sedimentação passa a equilibrar a variação do nível do mar, e a componente de agração vertical vai dominar. C) Caloviano inf. há um episódio de rápida retrogradação com redução drástica das fácies ante-	

barreira e subida do nível do mar, seguida de nova fase progradante (Azerêdo, 1993). Foi assinalado a idade do afloramento em estudo	35
Fig. 3.7 – Coluna litostratigráfica sintética da Formação de Santo António-Candeeiros, assinalando os principais marcadores considerados (Azerêdo, 2007). Foi dado ênfase na imagem para o Mb. de Codaçal, do qual o afloramento em estudo faz parte.	35
Fig. 3.8 – Síntese interpretativa integrada da organização sequencial do Jurássico Inferior e Médio da Bacia Lusitânica em termos de Ciclos (2ª ordem) maiores de Fácies Transgressivas-Regressivas, mostrando em paralelo a sucessão litostratigráfica e condições paleodeposicionais que os materializam (Azerêdo <i>et al.</i> 2014). Foi sinalizada na imagem a formação em estudo. TST= <i>Transgressive System Track</i> ; LST = <i>Lowstand System Track</i> ; HST = <i>Highstand System Track</i>	35
Fig. 3.9 – Reconstituição dos Paleoambientes sedimentares propostos para as diversas litofácies e as suas associações, no quadro de um sistema de rampa carbonatada. O declive está exagerado com o propósito de evidenciar os diferentes subambientes de rampa interna (Azerêdo 1993). Foram assinaladas com um rectângulo as litofácies relevantes para o presente estudo.	36
Fig. 4.1 – Esquema simplificado das etapas para a obtenção de lâminas impregnadas com Azul Ceres ...	40
Fig. 4.2 – Bomba de vácuo utilizada para saturar as amostras em água	41
Fig. 4.3 – Plugs obtidos por carotagem de algumas amostras	42
Fig. 4.4 – Porosímetros por expansão de gás He (Ergo Tech e Vinci).	43
Fig. 4.5 – medida da permeabilidade absoluta do gás utilizando a Lei de Darcy	44
Fig. 4.6 – Permeâmetro digital de gás (DGP-200 e Vinci <i>GasPerm</i>).....	45
Fig. 4.7 – Classificação composicional de Folk (1959, 1962) in Kendall (2005)	46
Fig. 4.8 – Classificação textural de Dunham (1962) com termos adicionais de Embry& Klovan (1971) in Tucker (1981).....	46
Fig. 4.9 – Classificação segundo Wright (1992).....	47
Fig. 4.10 – Classificação da Porosidade segundo Choquette & Pray (1970) in Flügel (2010).....	50
Fig. 4.11 – Classificação qualitativa da porosidade. Retirado de Inês <i>et al.</i> 2012.....	50
Fig. 4.12 – Classificação qualitativa da permeabilidade segundo Gomes & Alves (2007).....	51
Fig. 4.13 – Relações porosidade/permeabilidade para rochas carbonatadas seguindo a classificação de Dunham (Akbar, <i>et al.</i> ,1995).	51
Fig. 4.14 – Relação entre a garganta e tamanho (Volume) de poros para diversos rock types e permeabilidade. Retirado de Nurmi & Standen (1997)	52
Fig. 4.15 – <i>Reservoir Rock Type</i> - RRT, relação entre litofácies, tamanho, conectividade e continuidade dos poros e permeabilidade. Exemplo num caso de reservatórios carbonatados (calcário e dolomitos). Retirado de Sousa <i>et al.</i> (2014).	53
Fig. 4.16 – Classificação do tipo de reservatório segundo Ahr (2008).....	54

Fig. 5.1 – <i>Oolitic Sandsheets</i> na Zona do Vale Florido	55
Fig. 5.2 – Fóssil de um Coral.....	55
Fig. 5.3 – Calcário Oolítico de textura grainstone	56
Fig. 5.4a – <i>Cross sets</i> de baixo ângulo	56
Fig. 5.4b – Laminação Oblíqua	56
Fig. 5.5 – Calcário oolítico de granularidade fina e nível Lag no topo	56
Fig. 5.6 – Nível biostroma interdigitado com nível de calcário oolítico	57
Fig. 5.7 (a,b, c) – Calcários com macroporosidade associada a diaclasamento e fracturação	58
Fig. 5.8 – Nível de hardground	58
Fig. 5.9 – a) Locais de amostragem e poços fictícios traçados. b) Locais de amostragem ajustados aos poços. Relação entre as litofácies e oscilações de alta frequência do nível relativo do mar/ciclos elementares.	59
Fig. 5.10 – Locais de amostragem no Sector A (VFJ1 e VFJ2)	60
Fig. 5.11 – Locais de amostragem no Sector A. a) Amostra VFJ3; b) Amostras VFJ3 e VFJ4; c) Amostras VFJ4 e 5	61
Fig. 5.12 – Local de Amostragem do nível A6 (amostra VFJ6).....	62
Fig. 5.13 – Local de Amostragem do nível A7 (amostra VFJ7).....	62
Fig. 5.14 – Local de Amostragem do nível B1 (amostra VFJB1)	62
Fig. 5.15 - Fóssil de um coral, na base do nível B1	62
Fig. 5.16 – Local de amostragem do nível VFJB1,5	63
Fig. 5.17 – Local de amostragem do nível VFJB2,5	63
Fig. 5.18 – Locais de Amostragem do sector B (VFJB2, VFJB3 e VFJB4).....	63
Fig. 5.19 – a) Local onde o nível biostroma B2 termina e passa lateralmente a calcário oolítico (camada C1); b e c) Locais de Amostragem do sector C (amostra VFJC1).....	64
Fig. 5.20 – Local de amostragem do nível D1	64
Fig. 5.21 – a) Local de amostragem do nível D1 e D2; b) Diferenças granulométricas observáveis dentro do nível D2.....	65
Fig. 5.22 – a) Local de amostragem do nível D3; b) inclinação dos ripples ascendentes.....	65
Fig. 5.23 – Estilólitos em patamar com macroporosidade associada	66
Fig. 5.24 – Local de amostragem do nível D4.....	66
Fig. 5.25 – Local de amostragem do nível D5	66
Fig. 5.26 – Graus elevados de alteração presentes no Sector E.....	67

Fig. 5.27 – Dissolução e posterior precipitação de calcite.....	67
Fig. 5.28 – Local de amostragem do nível E1	67
Fig. 5.29 – Estratificação oblíqua no topo de E1	67
Fig. 5.30 – Local de amostragem do nível E1,5	68
Fig. 5.31 – Local de amostragem do nível E2	68
Fig. 5.32 – Coral presente no nível E2	68
Fig. 5.33 – Heterogeneidade dentro do nível biostroma.....	68
Fig. 5.34 – Local de amostragem do nível E2,5	69
Fig. 5.35 – Local de amostragem do nível E3	69
Fig. 5.36 – Locais de amostragem dos níveis F1 e F2.....	70
Fig. 5.37 – Local de amostragem do nível F1,5 e F2,5.....	70
Fig. 5.38 – Hardground presente no Sector F (acima do nível F2/F2,5)	70
Fig. 5.39 – Cacário oolítico com estratificação oblíqua (Cross bedding).....	71
Fig. 5.40 – Calcário oolítico com estruturas sedimentares com um nível biostroma no meio	71
Fig. 5.41 – Local de amostragem dos níveis F2,75 e F3	71
Fig. 5.42 – Local de amostragem do nível F3	71
Fig. 5.43 – Nível mais oolítico com corais presentes no nível F3	71
Fig. 5.44 – Local de amostragem do nível G1	72
Fig. 5.45 – Local de amostragem do nível G 1,5.....	72
Fig. 5.46 – Local de amostragem do nível G2	73
Fig. 5.47 – Local de amostragem do nível G 2,5.....	73
Fig. 5.48 – Coral na base do nível G2/G2,5	73
Fig. 5.49 – A1-2) taliscas e amostra de mão do nível VFJ1; B) micritização no núcleo de um oóide;C) estilólito colunar com alguma porosidade interpartícula D) porosidade intrapartícula, dentro de oóides; E) oóides interpenetrados e fracturação.....	75
Fig. 5.50 – Amostra de mão do nível VFJ2.....	75
Fig. 5.51. – A) amostra de mão do nível VFJ3; B) coraliário; C e D) tipos de cimento; E e F) exemplos da porosidade intrapartícula presente.	77
Fig. 5.52. – A) amostra de mão do nível VFJ4; B) bioclasto que foi posteriormente preenchido por pelóides e calcite; C,D e E) tipos de cimento; na imagem D pode-se também observar um litoclasto com alguma ferrugem associada; na imagem E pode-se observar oóides fracturados, essa fractura foi depois preenchida por cimento.....	78

Fig. 5.53. – A) amostra de mão do nível VFJ5; B) aspecto geral da Lâmina vista à lupa binocular C) pormenor de um coraliário preenchido por cimento pelóidico; D) alga calcária; E) coraliário de menor dimensão fracturado.....	80
Fig. 5.54 – Amostra de mão do nível VFJ6.	80
Fig. 5.55 – Amostra de mão do nível VFJ7.	81
Fig. 5.56. – A) amostra de mão do nível VFJB1; B) cristais dente de cão C) fragmento de coraliário; D, E e F) tipos de cimento presentes.	82
Fig. 5.57 –A) amostra de mão (1) e taliscas (2) do nível VFJB1,5; B) óxidos de ferro presentes (pirite?); C) óxidos de ferro a preencher uma microfractura dentro de um oóide, pode-se observar também porosidade intrapartícula dentro dos dois oóides interpenetrados; D) porosidade intrapartícula dentro de um oóide grosseiro (~1mm); E-F) exemplos de oóides fracturados, com lamelas deslocadas, em F o oóide tem porosidade intrapartícula associada; G-H) exemplos de bioclastos (algas calcárias) presentes na lâmina.....	84
Fig. 5.58 – Amostra de mão do nível VFJB2 (A) e B2,5 (B).	84
Fig. 5.59 – A) amostra de mão e taliscas do nível VFJB3; B) porosidade intrapartícula dentro de um fragmento de equinoderme observado na Lâmina B3; C) estratificação paralela marcada por diferenças de granulometria na lâmina B3 vista à lupa binocular. D) gastrópode parcialmente preenchido por pelóides observado na lâmina B3. E) lâmina B3 (A) – pode-se observar no local X porosidade no bordo de um grão que foi dissolvido e posteriormente preenchido por calcite. F e G) fases de cimentação observadas na lâmina B3 (A).....	86
Fig. 5.60. – A) amostra de mão do nível VFJB4; B e C) exemplos de bioclastos presentes, em C pode-se observar um coraliário e e em D uma alga calcária (?); D e E) alguns dos tipos de cimento presentes.....	87
Fig. 5.61. – A) amostra de mão do nível VFJC1; B e C) alguns dos bioclastos presentes; em C pode-se observar uma alga calcária e em B crinóides; D) estilólito presente na lâmina C1, com porosidade interpartícula associada; E) alguns dos tipos de cimento presentes, pode-se também observar fracturação de partículas, estando a fissura preenchida por calcite; F) diferenças granulométricas, estratificação oblíqua.....	89
Fig. 5.62. – A) amostra de mão do nível VFJD1; B e C) porosidade interpartícula e de canal associada a estilólitos; D) crinóide e alga calcária presentes na lâmina; E) tipos de cimento.	90
Fig. 5.63. – A) amostra de mão do nível VFJD2; B -D) porosidade fenestrada/vuggy presente nos níveis mais grosseiros (mesosporos); E-G) tipos de cimento presentes; H) óxidos de ferro observáveis; I) alga calcária	92
Fig. 5.64. – A) amostra de mão e uma das taliscas do nível VFJD3. Na talisca (A2 e A3) pode-se observar um estilólito que sofreu dissolução, semelhante ao que é observado na lâmina D3; B e C) oóides com lamelas deslocadas, fracturação por compressão; em B pode-se ainda observar porosidade intrapartícula e intercrystal. D) porosidade oomóldica observada em D3 (A). E (1-6) - estilólito ampliado por dissolução observado em D3, aspecto geral (E1-E2) e detalhes do mesmo (E3-E6).....	94
Fig. 5.65. – A) taliscas do nível VFJD4 B e C) óxidos de Ferro (Pirite?) dentro de oóides, em B estes apenas se encontram nos anéis dos oóides e em C encontram-se também no núcleo tendo alguma pequena porosidade associada. D e E) exemplos dos bioclastos presentes, em D observa-se um bivalve e em E	

observa-se uma alga calcária; F-I) exemplos da porosidade, Em F observa-se porosidade moldada e em F-H observa-se porosidade interpartícula e intrapartícula. 96

Fig. 5.66 – A) amostra de mão do nível VFJD5; B-F) exemplos da porosidade presente na lâmina, grandemente porosidade tipo *vug* que se formou nos bordos de bioclastos, pode-se também observar porosidade interpartícula e intrapartícula. Em B, C e D, podem-se observar poros de geometria romboédrica que poderão ter tido origem em dissolução de dolomite. 98

Fig. 5.67. – A) amostras de mão do nível VFJE1; B) alga calcária presente na lâmina VFJE1. C-D) porosidade dentro de equinodermes (intrapartícula); E) porosidade intraoóide; F-G) porosidade moldada. Em F pode-se observar cristais de cimento romboédricos que seriam cristais de dolomite tendo depois sofrido desdolomitização, sendo que alguns desses cristais foram dissolvidos gerando porosidade intercrystal; H) porosidade intrapartícula; I) porosidade interpartícula associada a um estilólito do tipo hummocky. 100

Fig. 5.68 – Amostra de mão do nível VFJE1,5. 100

Fig. 5.69. – A1-2) amostra de mão do nível VFJE2; B1-3) estilólitos com porosidade de canal associada (lâmina E2); C) coraliário presente na lâmina E2; D1-2) estilólitos com porosidade interpartícula associada (lâmina E2(A)); E) Porosidade intrapartícula (lâmina E2 (A)); F) Porosidade intrapartícula, interpartícula e moldada (lâmina E2). 102

Fig. 5.70 – Amostra de mão do nível VFJE2,5. 102

Fig. 5.71 – A1-2) amostra de mão do nível VFJE3; B) porosidade intrapartícula, interpartícula e *vug*, C1-2) alga calcária, em C2 pode-se observar porosidade dentro da alga calcária (intrapartícula) D) oóides muito micritizados, com porosidade associada; E1-3) alguns dos tipos de cimentos presentes na lâmina. 102

Fig. 5.72 – Amostra de mão do nível VFJF1. 104

Fig. 5.73 – A) amostra de mão do nível VFJF1,5; B) agregado com partículas ferruginizadas; C-F) porosidade intrapartícula. Pode-se também observar (em especial em E), partículas com inclusões de óxidos de ferro; G) serpulídeos. 106

Fig. 5.74. – A1-2) amostra de mão do nível VFJF2; B1-7) exemplos da porosidade presente. Em B1 observa-se porosidade intrapartícula, um dos oóides tem uma lamela deslocada e porosidade (intrapartícula) associada a essa fractura. Em B2 observa-se porosidade intrapartícula dentro de um lamelibrânquio e em B3 porosidade interpartícula entre esse lamelibrânquios e outros grãos. Em B4 observa-se porosidade intra e interoóides. De B5-7 observa-se porosidade intraoóide e intercrystal. É também possível observar alguns cristais romboédricos que se pensa terem sido cristais de dolomite que sofreram depois desdolomitização. 108

Fig. 5.75. – A) taliscas do nível VFJF2,5; B-D) porosidade intrapartícula (intraoóides), tipo de porosidade em maior abundância na lâmina; E) porosidade intrapartícula, intercrystal e moldada – poros de geometria romboédrica, provavelmente resultantes de dissolução de dolomite; F-G) pormenor de um bioclasto (Coral) presente em F2,5. 109

Fig. 5.76 – A) amostra de mão do nível VFJF2,75; B) porosidade intrapartícula (intraoóide); pode-se também observar um romboedro de dolomite que sofreu desdolomitização; C-E) estilólito com porosidade de canal associada. 111

Fig. 5.77. – A1-2) amostras de mão e taliscas do nível VFJF3; B-C) exemplos de bioclastos presentes na lâmina (B) alga calcária (C) coraliário (?), que sofreu recristalização acentuada; D-G) exemplos de porosidade intrapartícula; H-I) exemplo de algumas das fases de cimentação presentes.	112
Fig. 5.78. – A1-2) amostras de mão dos níveis G1 (A1) e G1,5 (A2); B1-2) alguns tipos de cimentação presentes na lâmina G1; C) exemplo de um bioclasto presente na lâmina (coraliário?); D1-4) exemplos de porosidade presentes na lâmina. Porosidade essencialmente intrapartícula, mas em D3 pode-se observar também porosidade moldada, interpartícula e intercrystal.	114
Fig. 5.79. – A1-2) amostras de mão dos níveis G2 (A1) e G2,5 (A2). B e C) bioclastos presentes na lâminas. Em B serpulídeos, e em C equinoderme? D-F) exemplos de porosidade observada. Em D observa-se porosidade interpartícula associada a um pequeno estilólito, em E observa-se porosidade com uma forma romboédrica (antigo cristal de dolomite? – porosidade móldica) e em F observa-se porosidade primária dentro de equinodermes; G e H) exemplos de cimentos. Em G observa-se cimento sintáxico com inclusões de equinodermes e em H cimento drúsico dentro de um clasto e granular entre os grãos.	115
Fig. 5.80 – Relação entre a proporção dos tipos de poros com as diferentes litofácies.	119
Fig. 6.1 – Representação do <i>Workflow</i> utilizado neste capítulo	120
Fig. 6.2 – Representação esquemática da MD, TVD e TVDSS	121
Fig. 6.3 – Representação dos poços fictícios e locais de amostragem. Esquematização das litofácies presentes no afloramento e correspondência destas com as oscilações de alta frequência do mar (ciclos elementares).	121
Fig. 6.4 – Carta Topográfica 328 à escala 1:25 000, do IGeoE (Instituto Geográfico do Exército), e área de interesse que foi selecionada.	122
Fig. 6.5 – Curvas de nível e localização geográfica do polígono final da área em estudo e dos poços verticais criados.	123
Fig. 6.6. – Zonas e Horizontes/níveis geológicos correspondentes (<i>well tops</i>).	124
Fig. 6.7. – Localização dos poços verticais e <i>dummy wells</i> . Imagem sobrelevada 1,2x.	124
Fig. 6.8. – Passos para criação de superfícies.	125
Fig. 6.9. – Superfícies em visualização 3D, com uma sobrelevação de 1,2x.	125
Fig. 6.10. – <i>Inputs</i> da <i>grid</i> e esqueleto do modelo criado pelo Petrel.	126
Fig. 6.11. – Tipos de terminação de horizontes.	127
Fig. 6.12. – Parâmetros de criação de zonas (<i>make zones</i>).	127
Fig. 6.13. – <i>Layering</i> e fracções utilizadas no mesmo.	127
Fig. 6.14. – Log original das fácies Vs Log após o <i>upscale</i> para a <i>grid</i> e após geração do modelo 3D....	128
Fig. 6.15. – Parâmetros do <i>upscale</i> das porosidades.	129
Fig. 6.16. – Log Litofácies Vs Log de litofácies após <i>upscale</i> para a <i>grid</i> e geração do modelo 3D ; Log de porosidades Vs Log de porosidade após <i>upscale</i> para a <i>grid</i> e geração do modelo 3D.	130

Fig. 6.17. – Parâmetros de entrada para realização do modelo de fácies.....	131
Fig. 6.18. – Modelo de litofácies e respectivo histograma. Imagem sobreelevada 1,2 x.....	132
Fig. 6.19. – Modelo de Fácies em cada uma das zonas numa determinada Layer (K). Imagens sobreelevadas 1,2 x	133
Fig. 6.20. – (a) Corte E-W; (b) Corte N-S, (b1)- ampliação de um corpo biostroma.	134
Fig. 6.21. – Exemplo de parâmetros de entrada no modelo de porosidades	135
Fig. 6.22. – Modelo de Porosidades (imagem sobrelevada 1,2 x) e respectivo histograma e estatísticas.	136
Fig. 6.23. – Modelo de Porosidades em todas as zonas numa determinada layer (K). Imagens sobreelevadas 1,2 x.....	137
Fig. 6.24. – Exemplos de corpos com porosidade boa e/ou boa permeabilidade. Exemplos nos níveis E2, E1 e D3	138
Fig. 6.25. – Exemplos de corpos com porosidade moderada (7-8%) nos níveis F1/1,5 e F2,75	138
Fig. 7.1. – Esquema das propriedades petrofísicas do reservatório, mostrando a relação da fácies com ciclos elementares e porosidade, e permeabilidade expectável nos níveis mais porosos.....	144

Índice de Tabelas

Tab. 2.1- Compacção mecânica VS compactação química e produtos/marcas diagenéticas típicas. Adaptado de Flügel (2004). a) oóides com orientação devida à compactação mecânica, alguns grão interpenetrados e alguns com contactos suturados (lâmina C1 do presente trabalho). b) estilólito originado por compactação química e dissolução (lâmina E2 do presente trabalho).....	10
Tab. 2.2- Marcas/produtos diagenéticos resultantes de dissolução. a) porosidade moldada (lâmina E1 do presente trabalho) b) estilólito dissolvido que forma porosidade de canal (lâmina D3 do presente trabalho); c) porosidade do tipo vug/vacuolar (lâmina D5 do presente trabalho).....	11
Tab. 2.3 - Tipo de cimentos carbonatados, principais características e génese (adap.Flügel, 1982; Tucker, 1988; Wright, 2002 <i>in</i> Pimentel, 2005). A compilação das referências constantes da coluna "autores" é da autoria de Pimentel (2005), onde as mesmas podem ser encontradas.	13
Tab 2.4 – Marcas/produtos diagenéticos característicos da dolomitização e desdolomitização. Adaptado de Adams <i>et al.</i> (1984), Varol & Margaritz (1991) e Azerêdo (1993)	18
Tab 2.5 – Ambiente meteórico vadoso, freático e de mistura – Características do ambientes e marcas/produtos diagenético mais comuns desses ambientes. Adaptado de Flügel (2004)	21
Tab. 2.6 – Ambiente marinho pouco profundo e ambiente marinho profundo (freático) – Características do ambiente e marcas/produtos diagenético mais comuns. Adaptado de Flügel (2004); Tucker & Wright (1990) e James & Choquette (1990)	22
Tab. 2.7- Marcas/produtos diagenéticos mais comuns do ambiente de soterramento. Adaptado de Flügel (2004).....	24
Tab. 3.1- Litofácies reconhecidas no Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho, com respectiva interpretação paleoambiental (Azerêdo 1993, 1998; <i>in</i> Pimentel 2005 e Inês 2010). Foi dado ênfase às três litofácies encontradas no afloramento em estudo.....	36
Tab. 5.1 – Resultados da porosidade obtidos através do ensaio da saturação em água e estimados em Lâmina delgada.....	117
Tab. 5.2 – Resultados da porosidade e permeabilidade obtidos através dos métodos do porosímetro de expansão de gás He e permeâmetro de gás digital respectivamente	117
Tab. 5.3 – Relação entre a porosidade obtida nos diferentes métodos e litofácies	118
Tab. 6.1 – Limite e número de células da <i>grid</i>	118

1. Introdução

Este trabalho surgiu da ideia de realizar um estudo na área das Geociências do Petróleo, área de interesse crescente na Faculdade e na qual me especializei. Esta é uma área de estudo multidisciplinar que exige o conhecimento de diversos conceitos e ferramentas.

Um dos interesses nesta área recaiu para mim no estudo dos carbonatos, uma área complexa e desafiante da geologia e cuja importância económica é enorme. Assim nasceu a ideia de realizar uma dissertação que incidisse não só no estudo de formações carbonatadas como análogos de reservatórios petrolíferos mas também na integração de tecnologia que permitisse a sua modelação, tendo sido possível concretizar este objectivo pela oportunidade de colaboração entre a FCUL e a Partex Oil & Gas.

1.1. Objectivos

O trabalho teve como objectivos aferir e aperfeiçoar a construção de modelos adequados à previsão da distribuição de *geobodies* e qualidade de reservatórios carbonatados, utilizando um conjunto de dados reais, obtidos por meio do estudo de afloramentos seleccionados de calcários de fácies de barreira do Jurássico Médio (Batoniano), da região de Vale Florido (a sul de S. Bento, Maciço Calcário Estremenho). Através do estudo da distribuição dos *geobodies* e propriedades dos mesmos (ϕ e k), pode-se também averiguar o potencial enquanto armadilha estratigráfica.

O estudo abrangeu diversos aspectos e foi organizado segundo diversas etapas:

- Análise multiscala das unidades seleccionadas (litofácies, petrografia e diagénese, estratonomia e geometria dos corpos sedimentares, heterogeneidades macro/mesoscópicas, etc), combinando observação de campo e estudo em lâmina-delgada;
- Obtenção de valores de porosidade e de permeabilidade representativos das mesmas unidades. Para ambas as propriedades foram recolhidas amostras, para o efeito, e medidas em laboratório; a 1ª propriedade foi medida através do método de saturação em água e pelo porosímetro de expansão de gás Hélio (*Helium gas expansion porosimeter*) – a 2ª

propriedade foi medida em laboratório através de um permeâmetro de gás digital (*digital gas permeameter*);

- Utilização do conjunto de dados reais com vista à construção de um modelo estratigráfico baseado em *software* de modelação de reservatórios, testando diversos constrangimentos, efetuando sucessivos *up-scaling* e articulando com a informação regional existente;
- Integração dos dados na perspectiva da caracterização, modelação e potencial de previsão da qualidade dos reservatórios carbonatados, atendendo em especial à múltipla heterogeneidade que os tipifica.

1.2. Singularidades dos carbonatos e importância económica do seu estudo

Os carbonatos formam-se maioritariamente em ambientes marinhos pouco profundos e costeiros (carbonatos perimareais a recifais), em ambientes continentais áridos quentes, como por exemplo bacias evaporíticas, e em ambientes lacustres (Tucker & Wrigh, 1990).

As rochas carbonatadas apresentam certas propriedades intrínsecas como a composição, a porosidade e a permeabilidade. No caso das rochas carbonatadas, em especial as de origem marinha, estas têm uma determinante influência biológica, tendo na sua constituição uma enorme variedade de componentes mineralógicas e biológicas das mais variadas origens.

Os reservatórios carbonatados são complexos, exibindo muito maior diversidade na textura, composição das partículas, efeitos diagenéticos e na variabilidade de pequena escala de todas estas propriedades, que vão afectar a qualidade dos reservatórios (e.g Ahr, 2008).

Caracterizar muitas das fácies carbonatadas é difícil nos logs de poço e *cores* de dimensão centimétrica (Choquette & Pray, 1970) e portanto é importante um estudo de campo e/ou de amostras/testemunhos complementar. O estudo geológico e petrofísico de afloramentos, caracterizados por continuidade lateral a escalas relevantes do reservatório, é também bastante importante uma vez que pode ajudar a entender e validar métodos de modelação para propriedades de reservatório (Borgomano *et al.* 2013).

Por comparação com os reservatórios siliciclásticos, a diagénese nos carbonatos é bastante mais importante e complexa (Choquette & Pray, 1970), sendo que macroporosidade extensiva pode gerar-se em profundidade (corrosão em soterramento).

A geometria/arquitectura dos reservatórios é também diferente da dos reservatórios siliciclásticos. Nos reservatórios siliciclásticos os limites reservatório/não-reservatório são frequentemente bruscos; nos carbonatados, no entanto, há frequentes relações de gradação entre unidades reservatório e não-reservatório - fácies deposicionais e diagenéticas frequentemente variam gradualmente e de modo complexo e por isso os limites reservatório/não-reservatório são menos óbvios e lineares (e.g. Ahr, 2008; Wright, 2002a). A expressão sísmica é também por norma mais esbatida do que em siliciclásticos.

As rochas carbonatadas têm uma grande importância económica, uma vez que contêm cerca de 60% das reservas mundiais de petróleo, geraram cerca de 40% dos hidrocarbonetos e representam cerca de 70% dos reservatórios do Médio Oriente (*Schlumberger market analysis*, 2007; *BP statistical review*, 2007). Os carbonatos podem apresentar diversas fácies que poderão funcionar como reservatório, gerador ou selo; por outro lado, a dinâmica sedimentar pode proporcionar geometrias com potenciais armadilhas estratigráficas e diagenéticas diversas (Azerêdo, 2013).

1.3. Sistema Petrolífero

Para que um sistema petrolífero se forme são necessárias diversas componentes e processos que levam à geração e acumulação de hidrocarbonetos. As componentes necessárias são: uma rocha geradora, uma rocha reservatório e uma rocha selante (ou armadilhas) que impeça o petróleo de escapar e processos de maturação e migração, no caso de sistemas convencionais. O *timing* apropriado da formação destes elementos e processos são necessários à acumulação e preservação dos hidrocarbonetos gerados. Neste trabalho o afloramento em estudo é analisado como um possível análogo de reservatório e também como armadilhas estratigráficas de um sistema petrolífero.

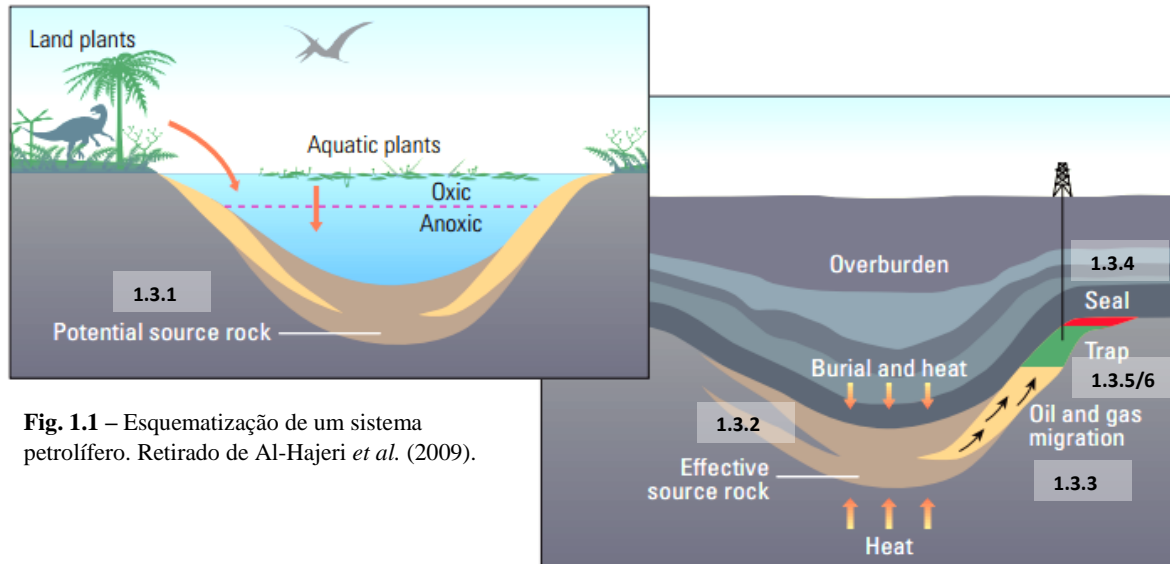


Fig. 1.1 – Esquemática de um sistema petrolífero. Retirado de Al-Hajeri *et al.* (2009).

1.3.1. Rocha geradora

Uma rocha geradora é uma rocha rica em matéria orgânica que, quando aquecida o suficiente, gera óleo ou gás. Rochas geradoras típicas (*shales*, calcários) contêm cerca de 1% de matéria orgânica e pelo menos 0.5% de TOC (carbono orgânico total).

No Maciço Calcário Estremenho (MCE) a Formação de Cabaços é a que tem características de potencial rocha geradora, podendo “alimentar” um ou mais sistemas petrolíferos.

1.3.2. Maturação

Processo através do qual a rocha geradora passa a ser capaz de produzir óleo e gás quando submetida a temperaturas e pressões apropriadas. Em geral uma rocha mãe, gera óleo entre os 100°C e os 150°C (janela do óleo) e gás entre 150°C e 230°C (janela do gás), alguns autores propuseram temperaturas mais baixas para o início da janela do óleo (~60°C), não sendo no entanto uma situação típica (Mackenzie & Quigley, 1988; Killops & Killops, 1993). A profundidade a que essas temperaturas são atingidas é variável consoante o gradiente geotérmico da bacia.

1.3.3. Migração

É a movimentação dos hidrocarbonetos da rocha geradora até ao reservatório. Existe primeiramente uma migração primária, também designada de expulsão, dentro da rocha mãe seguida da migração secundária desde a rocha mãe até a um reservatório constrangido por uma armadilha.

1.3.4. Selo

Rocha relativamente impermeável, geralmente *shales*, anidrite ou sal que forma uma barreira, em torno da rocha reservatório impedindo a migração de fluidos.

1.3.5. Armadilhas

Configurações de rochas que proporcionam a retenção de hidrocarbonetos que são seladas por formações impermeáveis impedindo a migração de fluido. As armadilhas podem ser estratigráficas (como *pinch-outs*, desconformidades, variações laterais de fácies e *sand bars*), estruturais (dobras e falhas) ou mistas.

As armadilhas estratigráficas são agrupadas em três sub-categorias: armadilhas estratigráficas deposicionais (primárias), armadilhas estratigráficas associadas a discordâncias (acima ou abaixo da discordância) e armadilhas estratigráficas secundárias (Biddle & Wielchowsky, 1994).

As armadilhas estratigráficas secundárias podem ser subdivididas em dois tipos: armadilhas cujas alterações pós deposicionais podem originar tanto rochas reservatório de boa qualidade, derivadas de rochas que inicialmente não eram reservatórios, como criar selos em antigos reservatórios, devido à perda de porosidade pela ocorrência de cimentação dos poros; e armadilhas associadas ao aumento da porosidade e permeabilidade devido à dissolução e dolomitização durante o soterramento. Neste último tipo de armadilhas, a perda de porosidade das rochas não está apenas limitada à precipitação de cimentos diagenéticos, mas também à presença de asfaltos, “*permafrost*” ou hidratos de gás (agentes que podem funcionar como selos para este tipo de armadilhas).

1.3.6. Reservatório

Um reservatório é um corpo rochoso que se encontra na sub-superfície e que contém uma porosidade e permeabilidade suficientes para armazenar e mobilizar fluidos.

Para que uma rocha carbonatada constitua um bom reservatório, deve apresentar uma boa porosidade primária ou secundária e/ou de fratura, boa permeabilidade efectiva e um volume que permita acomodar uma grande quantidade de fluidos. Na maioria dos casos, estas rochas são mais extensas na realidade do que a área e/ou áreas correspondentes aos depósitos de fluidos nelas encontrados (Corrêa, 2003).

A porosidade nestes reservatórios varia com a textura, fabric, geometria das fracturas no reservatório rochoso e evolução diagenética (Ahr, 2008). A permeabilidade tem um papel vital, porque indica a capacidade que a rocha tem de transmitir fluidos dentro do reservatório propriamente dito e ao longo do canal de migração que liga o reservatório à rocha geradora (Jordan & Wilson, 1994).

Muitas vezes uma armadilha petrolífera contém várias rochas reservatórios intercaladas com várias unidades que constituem os selos. As armadilhas raramente contém uma rocha reservatório homogénea, apresentando, em geral, variações laterais e verticais da porosidade e da permeabilidade.

Estas variações devem-se a processos deposicionais (porosidade primária herdada), a efeitos diagenéticos que podem levar à geração de porosidade secundária e/ou colmatção da porosidade primária e/ou por efeito da deformação tectónica que leva a ocorrência de fracturação. Estas últimas duas causas podem levar à ocorrência de reservatórios de boa qualidade em carbonatos que inicialmente eram pouco porosos e impermeáveis. Por vezes, estas variações podem levar à presença de zonas não produtivas dentro da própria armadilha (Jordan & Wilson, 1994).

Dolomitos, *grainstones* e *boundstones* são normalmente os reservatórios carbonatados mais comuns para a exploração de hidrocarbonetos (Jordan & Wilson, 1994).

1.3.7. Momento Crítico

Momento de maior profundidade de enterramento. O momento crítico é o momento de maior probabilidade de aprisionamento/preservação de hidrocarbonetos num sistema petrolífero depois das armadilhas se formarem e dos hidrocarbonetos migrarem até ao reservatório e se acumularem, marcando o início do tempo de preservação num sistema petrolífero viável.

1.4. Heterogeneidades em reservatórios carbonatados: desafios de estudo

O maior desafio no estudo das rochas carbonatadas é a sua heterogeneidade em propriedades como: porosidade, permeabilidade, mecanismos de fluxo (*flow*). Os geocientistas que estudam as rochas carbonatadas enfrentam desafios tecnológicos significativos na caracterização, modelação e produção de um reservatório carbonatado devido à génese das rochas carbonatadas, a sua história de enterramento e diagénese. Estes desafios centram-se nas ferramentas e metodologias

utilizadas para os estudos e análises. No decurso dos estudos operacionais e de optimização de reservatórios, as heterogeneidades, a qualquer escala, têm de ser caracterizadas, quantificadas e modeladas tendo em conta as incertezas associadas.

É necessário uma abordagem focada para melhor compreender a natureza heterogénea das rochas que contêm fluidos e as propriedades do fluxo dentro das formações porosas e muitas vezes fracturadas envolvendo uma compreensão detalhada da saturação de fluidos, tamanho dos poros e a sua distribuição, permeabilidade, textura da rocha, tipo de reservatório e sistemas naturais de fracturas a diferentes escalas.

Para além das propriedades já referidas, a molhabilidade (*wettability*) é outra característica heterogénea nos carbonatos. A maior parte dos reservatórios detríticos são *water-wet*. No entanto, o envelhecimento das rochas carbonatadas que contêm água e óleo torna rochas inicialmente *water-wet* em *mixed-wet* ou mesmo *oil-wet*. Isso significa que o óleo pode aderir a superfície da rocha carbonatada levando a uma produção mais difícil.

A maior parte dos reservatórios carbonatados pensa-se serem *mixed-wet* ou *oil-wet*. Simulações mostram que ao inundar estes reservatórios com água, apenas uma pequena quantidade de óleo é recuperadas de camadas *oil-wet*, com factores de recuperação podem ser inferiores a 10% (Montaron, 2005).

Caracterizar a distribuição da *wettability* e compreender os seus efeitos na fluência (*flow*) do fluido dentro de um reservatório complexo é crucial para estimar as reservas produzíveis e determinar estratégias de desenvolvimento que maximizem a recuperação.

Associado a esta problemática está ainda o estudo da génese de determinadas barreiras à permeabilidade e a percepção de quanto elas afectam o comportamento dos fluidos no interior dos reservatórios e das armadilhas. Estes estudos permitem decifrar de maneira cada vez mais detalhada as relações espaciais entre as rochas geradoras, reservatórios e selos, que nem sempre são fáceis de estabelecer, uma vez que a distribuição dos poros e/ou canais de poros no interior destas rochas é geralmente muito mais complexa do que a observada nas rochas siliciclásticas, o que faz com que as correlações realizadas ao longo de várias camadas, bem como a previsão das potencialidades hidráulicas das mesmas, seja uma tarefa bastante difícil (Gomes & Alves, 2007).

2. A diagénese nas rochas carbonatadas

2.1. Diagénese e processos diagenéticos

A diagénese corresponde aos processos físicos, químicos ou biológicos que transformam sedimentos em rochas sedimentares (a relativa baixa temperatura e pressão) que pode resultar na mudança da textura ou mineralogia original da rocha. A diagénese está dependente de factores extrínsecos (físico/químicos) e intrínsecos (sedimentares). Os factores extrínsecos são a temperatura, pressão e condições químicas (Ph, conteúdo em CO₂, salinidade, etc) enquanto os factores intrínsecos são o tamanho das partículas (e a sua micro-estrutura), conteúdo em fluidos (quantidade e fluxo dos mesmos), conteúdo orgânico e composição mineralógica, porosidade e permeabilidade original.

Os sedimentos carbonatados, ao contrário dos depósitos detríticos usualmente não são transportados para longe da fonte, desta maneira, o seu tamanho, forma e calibragem tem baixa relação com a energia do sistema. O tamanho e a forma dos poros nos carbonatos são mais influenciados por material esquelético que pode ser muito variado (Ali *et al.*, 2010).

Estes sedimentos são compostos na sua maior parte por minerais de calcite, dolomite e aragonite, minerais metastáveis muito susceptíveis à ocorrência de alterações durante a evolução diagenética. Esta susceptibilidade deve-se ao facto de estes minerais serem muito solúveis, principalmente na presença de águas meteóricas e/ou águas resultantes da mistura entre águas meteóricas e marinhas.

Normalmente faz-se a distinção entre diagénese precoce e tardia para os carbonatos. A diagénese precoce consiste na diagénese que ocorre imediatamente depois da deposição da rocha e/ou logo após o seu soterramento, enquanto que a diagénese tardia se refere à ocorrência de diagénese muito depois da deposição do sedimento, quando este já se encontra compactado em rocha e sofre principalmente a actuação de processos derivados do soterramento (Flügel, 2004).

Alguns dos efeitos da diagénese ao longo da evolução das rochas são: a compactação, fracturação, a dissolução/precipitação de cimentos e formação de porosidade secundária.

Segundo Ahr (2008) a diagénese nas rochas carbonatadas em geral altera a porosidade inicial (primária), através da acção de vários tipos de processos diagenéticos, que podem ocorrer de

forma independente e/ou de forma híbrida podendo levar ao aumento e/ou à redução da porosidade primária durante a sua evolução diagenética.

Os processos diagenéticos que ocorrem nas rochas podem ter um impacto significativo não só na porosidade como na permeabilidade (Fig 2.1) e, por isso, modificar volumes no reservatório e taxa de fluxo sendo desta forma de grande interesse para geocientistas do petróleo no seu esforço para otimizar a produção de hidrocarbonetos. O estudo em detalhe da diagénese pode também indicar a ordem e o tempo relativo de um processo diagenético ao longo da evolução diagenética da rocha e assim estimar a importância da ocorrência destes para a preservação, geração ou redução da porosidade e permeabilidade.

Sabendo o valor destas duas propriedades petrofísicas pode-se definir o potencial que uma rocha tem enquanto reservatório ou selo num sistema petrolífero.

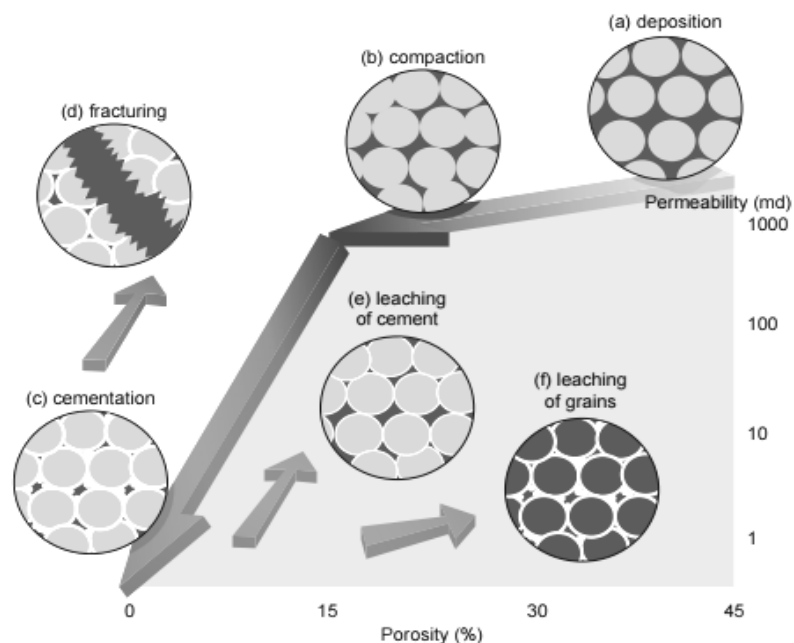


Fig. 2.1- Processos diagenéticos e impacto destes na porosidade e permeabilidade. Retirado de Nurmi & Standen (1997).

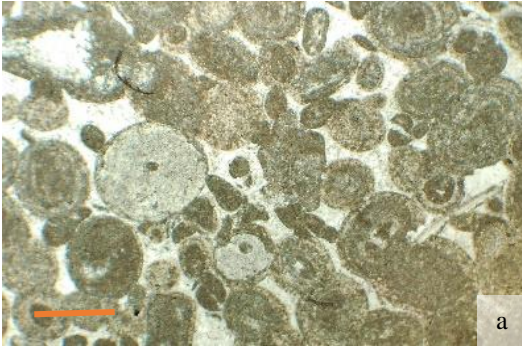
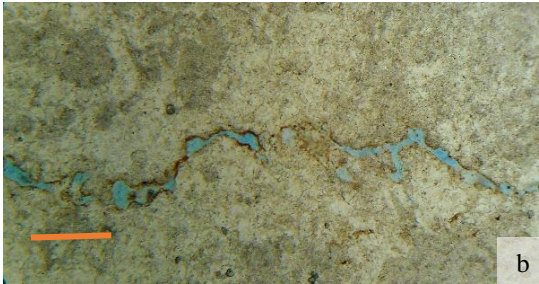
2.1.1. Compactação

A compactação é um processo físico ou químico no qual os sedimentos são consolidados, resultando numa diminuição dos espaços porosos e da permeabilidade à medida que os grãos vão sendo empacotados. À medida que as camadas de sedimentos acumulam, o aumento da pressão litostática durante o enterramento causa compactação dos sedimentos, perda de fluidos dentro dos poros e formação de rocha como grãos soldados ou cimentados uns aos outros.

Segundo Flügel (2004), a compactação pode ser subdividida em três etapas principais:

- Deposição das partículas sedimentares, desidratação, mudanças na densidade de empacotamento e redução da porosidade original para cerca de menos 75-80%;
- Predominantemente ocorrência de desidratação da vasa carbonatada, reorientação dos grãos e redução da porosidade para cerca de 40%;
- Ocorrência de dissolução sob pressão e de deformação plástica das partículas constituintes da rocha.

A compactação pode também ser separada em compactação mecânica ou compactação química, estando as diferenças ilustradas na tabela abaixo (Tab. 2.1):

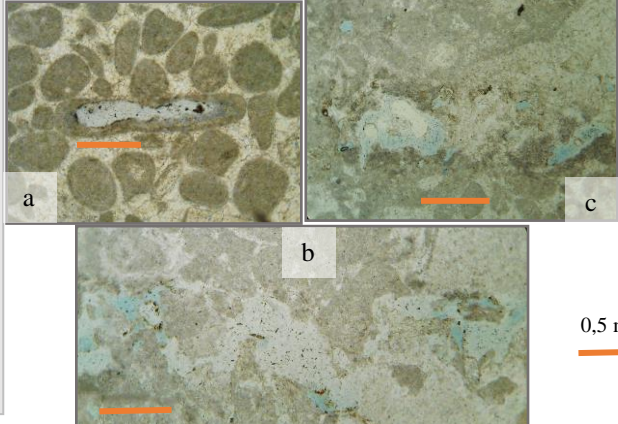
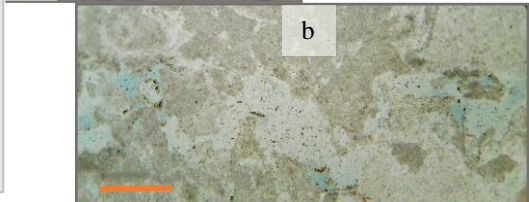
Compactação Mecânica	<p>Caracterizada por uma redução de volume da rocha carbonatada, neste caso, por processos inteiramente físicos durante o soterramento da mesma. Esta actua imediatamente após a deposição do sedimento. A compactação física tem como principais produtos o desenvolvimento de orientação, rotação, deslizamento, deformação de partículas, fracturação de grãos, bioclastos ou envelopes mícritos, compressão ou interpenetração de partículas (a).</p>	 <p>a</p>
Compactação Química	<p>Caracterizada pela redução acentuada do volume da rocha, controlada total ou parcialmente por dissolução da rocha devido ao incremento da pressão litostática durante o soterramento, ocorrendo na maioria das vezes em condições de soterramento profundo. A compactação química pode levar à ocorrência de dissolução com pressão, originando estilólitos (b), que poderão ser de diversos tipos e/ou “costuras” (<i>seams</i>), muitas vezes associados a estruturas de fracturação.</p>	<p>A compactação leva ao aumento de tortuosidade dos canais porosos e estrangulamentos nesses canais</p>  <p>b</p> <p>0,5 mm</p>

Tab. 2.1- Compactação mecânica VS compactação química e produtos/marcas diagenéticas típicas. Adaptado de Flügel (2004). a) oóides com orientação devida à compactação mecânica, alguns grão interpenetrados e alguns com contactos suturados (lâmina C1 do presente trabalho). b) estilólito originado por compactação química e dissolução (lâmina E2 do presente trabalho).

2.1.2. Dissolução

É o processo resultante da presença e/ou da passagem de fluidos subsaturados em CaCO_3 nos poros de uma rocha carbonatada levando à dissolução de grãos e cimento desta por serem constituídos por minerais metastáveis. Quanto maior for a subsaturação desses fluidos relativamente ao carbonato, mais eficaz é a dissolução, o que, consequentemente, leva à génese de porosidade secundária e ao aumento da porosidade inicial da rocha (Flügel, 2004). Este é um processo particularmente eficaz em ambiente meteórico pouco profundo (perto da superfície), em enterramento profundo e água frias (Steinsund & Hald, 1994; Flügel, 2004) bem como em ambiente marinho profundo (Berelson *et al.* 1994; Flügel, 2004)

A dissolução leva a modificações acentuadas na textura, porosidade e permeabilidade sendo os seus principais produtos/marcas diagénéticas descritos na tabela abaixo (Tab. 2.2):

Produtos da ocorrência de dissolução		
<p>Porosidade secundária do tipo: moldada (a), em canal (b), fractura, <i>vuggy</i> (c) e cavernosa (Tucker & Wright, 1990). Em ambientes profundos podem-se gerar faixas de estilólitos que podem reduzir a espessura original das rochas até cerca de 40%.</p>		

Tab. 2.2- Marcas/produtos diagénéticos resultantes de dissolução. a) Porosidade moldada (lâmina E1 do presente trabalho) b) estilólito dissolvido que forma porosidade de canal (lâmina D3 do presente trabalho); c) porosidade do tipo *vug* (lâmina D5 do presente trabalho).

2.1.3. Cimentação

Processo de precipitação de cimento entre minerais ou grãos de rochas formando clastos sedimentares, corresponde a uma fase de litificação.

No caso das rochas carbonatadas, este processo consiste no preenchimento dos poros pré-existent nas rochas por precipitação de cimento carbonatado, que pode apresentar diferente composição química e tipos de *fabrics* (dependendo da razão Mg/Ca). Os principais cimentos carbonatados são compostos por cristais de calcite, aragonite ou dolomite, podendo precipitar mais de que uma mineralogia de cimento nas rochas. O cimento precipitado une as várias partículas constituintes da rocha, podendo ou não levar ao total colmatar dos espaços porosos da

rocha, levando a uma drástica redução da porosidade e da permeabilidade (Fig. 2.2). O preenchimento por cimento é tão mais eficaz quanto maior for a sobressaturação de fluidos contidos nos poros em relação ao mineral precipitado (Flügel, 2004).

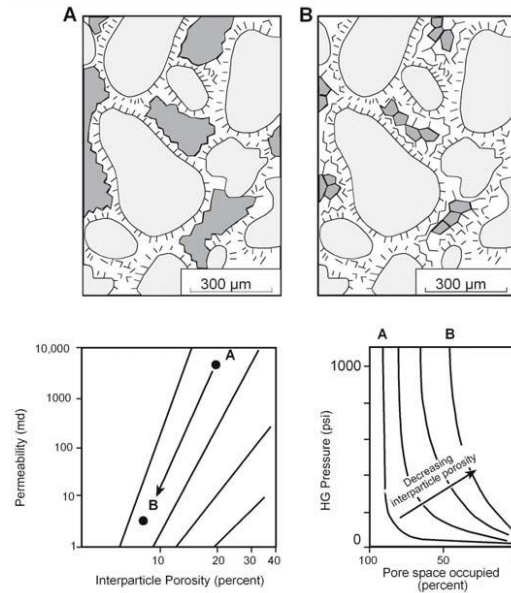


Fig 2.2. Mudança na permeabilidade e propriedades capilares com a redução da porosidade resultante da oclusão dos poros nos espaços intergranulares. A porosidade intergranular de 20% presente em **A** é reduzida por cimentação para 7% em **B**. a permeabilidade é sistematicamente reduzida e a forma da curva da pressão capilar é sistematicamente mudada para reflectir poros de dimensão mais pequena. Retirado de Lucia (1999).

Os factores que controlam a ocorrência de cimentação são: a composição dos fluidos contidos nos poros; a taxa de fluxo de água que passa nos poros, causado pelos níveis de energia (factor importante particularmente em ambientes de recife); porosidade primária (tamanho e geometria dos poros), permeabilidade, a saturação em iões, condições de salinidade; fracção Mg/Ca; composição da matéria orgânica contida dentro e/ou entre as partículas e a actividade dos micro-organismos mediante a precipitação de carbonato (Flügel, 2004).

Os cimentos podem se dividir em duas categorias principais com base na sua cronologia, com diversos sub-tipos consoante a morfologia. A primeira categoria inclui os cimentos precoces, que tendem a contornar a superfície dos poros. Exemplos deste tipo de cimentos são: fibroso, menisco, pelóidico, laminar, sparítico prismático. Da segunda categoria fazem parte os cimentos tardios que preenchem na totalidade os poros como seja cimento mosaico (crescimento competitivo de cristais). Estes cimentos precipitam posteriormente aos cimentos precoces, durante uma fase diagénética mais avançada (Tucker 1990 in Tucker & Wright, 1990).

A tabela abaixo (Tab. 2.3) apresenta os tipos de cimento carbonatado, bem como o tipo de ambiente em que estes precipitam.

Tipo de Cimento	Autor	Definição genérica	Génese	Termos semelhantes
Fibroso (1)	Friedman (1964, 1968); Wolf (1965); Gervitz & Fiedman (1966); Purser (1969); Germann (1968); Shinn (1969); Zanid (1971); Mountjoy & Walls (1977); Dravis (1979)	Fibras alongadas e finas ($\sim 10\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$), com o eixo maior perpendicular às paredes do poro ou superfície de um grão.	Normalmente corresponde à cimentação inicial sin-sedimentar. Típico da zona marinha freática.	Acicular (1a); Fibroso radial (1b); Circumgranular isópaco (1c) <u>Caso particular:</u> fibroso radiaxial – calcite fibroso de neoformação com extinção ondulosa (Bathurst 1959, 1971; Kendal & Tucker 1973)
Laminar (2)	Choquette & James (1987)	Cristais de forma laminar alongados ($\sim 20\mu\text{m}$, comprimento/largura < 10).	Comuns em ambientes marinhos freáticos e de mistura com águas meteóricas. Também pode ocorrer como cimento meteórico ou de enterramento (cimentação sin-sedimentar ou pós-enterramento)	Dente de cão/Prismático (2a). Colunar
Botroidal (3)	Ginsburg and James (1976)	Cimento de preenchimento de poros, consistindo em leques individuais ou compostos de fibras eudédricas alongadas de aragonite	Típico de ambiente marinho (comum em cavidade de recifes). Pode também formar-se em ambiente de enterramento	Esferulítico
Equicristalino (4)	Folk (1962); Bricker (1971); Harris, Kendal & Lerche (1985); Hird & Tucker (1988)	Cristais com dimensões iguais entre si ($\sim 100\mu\text{m}$). Podem representar secções transversais de cimentos prismáticos ou colunares.	Formam-se em ambientes freáticos meteóricos ou freáticos de enterramento.	Blocky (usado para cristais de granularidade mais grosseira); Sparite (s.l.);
Granular (5)	Bathurst (1958, 1975); Bricker (1971); Harris, Kendal & Lerche (1985)	Cristais anédrico a subédricos ($> 10\mu\text{m}$ a $60\mu\text{m}$), normalmente sem orientação preferencial e com tamanhos ligeiramente diferentes.	Geralmente formam-se depois da litificação do sedimento, após compactação em ambiente sub-marino ou sub-aéreo (cimentação pós enterramento)	Blocky (usado para cristais de granularidade mais grosseira); Sparite (s.l.); Microsparite (para cristais entre 10 e $80\mu\text{m}$)
Drúsico (6)	Bathurst (1958, 1975); Friedman (1968); Schneider (1977)	Cristais típicos de preenchimento de poros; cristais anédricos a subédricos ($> 10\mu\text{m}$) que vão crescendo segundo o eixo-c, bem como em dimensão, em direcção ao centro do poro. Os limites dos cristais são planares.	Existem em todos os tipos de ambiente; sendo comum na cimentação pós-enterramento	Sparite drúsica
Sintáxico (7)	Orme & Brown (1963); Evamy & Shearman (1965, 1969); Meyers (1974); Neugebauer & Ruhmann (1978); Burgess (1979)	Cristais grosseiros e límpidos de sparite desenvolvidos em continuidade óptica com grãos ou cimento anterior. Comum em equinodermes, podendo ocorrer em corais, moluscos e foraminíferos.	Podem-se formar em ambiente marinho, meteórico, de mistura ou de enterramento. Os cimentos sintáxicos sin-sedimentares são turvos e com inclusões, enquanto os de enterramento são límpidos	Sobrecrecimento sintáxico; Epitáxico
Mosaico (8)	Elf-Aquitaine (1975)	Cristais equicristalinos grosseiros ($\sim 300\mu\text{m}$) e límpidos de sparite, com clivagem bem visível, em conjuntos que formam um padrão em mosaico.	Típico de ambiente de enterramento	Espático; Mosaico equicristalino
Poiquilotópico (9)	Elf-Aquitaine (1975)	Cristais sparíticos de grandes dimensões (podendo atingir vários milímetros) e que envolvem vários grãos.	Formam-se em ambiente freático, normalmente típico de ambiente de enterramento	-
Micrítico (10)	Alexandersson (1969); Purser (1969); Dunham (1971); Folk (1971); Bathurst (1975)	Cristais de dimensão $< 4\mu\text{m}$ ou $< 10\mu\text{m}$, formando vasa. Pode formar envelopes ou pontes ligando grãos.	Ambiente marinho freático. Cimento inicial sin-sedimentar (calcite magnesiana – HMC, criptocristalino)	Microcristalino; criptocristalino
Pelóidico (11)	Alexandersson (1969); Macintyre (1977); Reid (1987); Marshal & Davies (1981); Sun & Wright (1989)	Partículas de dimensão de $20\mu\text{m}$ a $25\mu\text{m}$ formando aglomerados micríticos esféricos a subesféricos de cristais HMC de dimensões de 0.2 a $2\mu\text{m}$	Cimentação sin-sedimentar, abundante em recifes e montículos recifais. Associado a actividade microbiana e estruturas estromatolíticas e a pedogénese	Micrite grumosa
Ponte (12)	Puser (1969); Bricker (1971); Wright (1983)	Estreita faixa de cimento micrítico ligando dois clastos.	Comum em ambiente vadoso e pedogénico. Pode formar-se noutras condições por acção microbiana	-
Menisco (13)	Dunham (1971); Longman (1980); Meyers (1987); Hillgartner (2001)	Cristais sparíticos ou microcriptocristalinos de aragonite ou HMC, preenchendo parcialmente poros intergranulares, com contornos côncavos.	Típico de ambiente vadoso (supratidal e intertidal). Podem ocorrer em ambiente subtidal, se associado a estruturas microbianas	-
Pendente (14)	Puser (1969); Bricker (1971); Bernoulli & Wagner (1971); bechstadt (1975)	Cimento pendendo apenas de um dos bordos dos grãos (em disposição gravítica)	Típico de ambiente vadoso. Esporadicamente em ambiente intertidal e zona supratidal	Estalactítico; drústico; microestalactítico; gravítico

Tab. 2.3 - Tipos de cimentos carbonatados, principais características e génese (adap. Flügel, 1982; Tucker, 1988; Wright, 2002 in Pimentel, 2005). A compilação das referências constantes da coluna "autores" é da autoria de Pimentel (2005), onde as mesmas podem ser encontradas.

2.1.4. Recristalização (Neomorfismo)

O termo neomorfismo foi definido por Folk (1965), incluindo tanto a verdadeira recristalização como a inversão mineralógica. A verdadeira recristalização ocorre quando cristais muito pequenos de calcite se dissolvem e reprecipitam como cristais sparíticos maiores neoformados. Inversão é o processo pelo qual minerais metastáveis são modificados para minerais estáveis, geralmente sofrendo mudanças composicionais e cristalográficas, como seja a inversão de calcite magnésiana para calcite com pouco magnésio. Recristalização é um termo também utilizado para descrever processos de “reformaço” como aqueles que ocorrem durante o metamorfismo de calcários para margas, ou quando novos cristais se formam durante um período de elevado *stress* (Ahr, 2008).

A recristalização pode apresentar diversos tipos de *fabrics* (Fig. 2.3) e tem como principais produtos diagenéticos: associações de cristais de diferentes tamanhos, cristais curvos nas suas interfaces, “fantasmas” de micrite no interior de cristais, foraminíferos constituídos por calcite grosseira na sua parte central, transformação de micrite em microsparite e transformação de microsparite em sparite grosseira (e.g. Ahr, 2008).

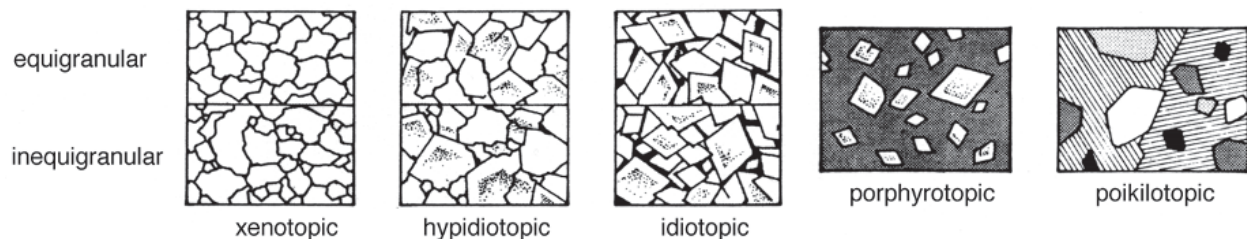


Fig. 2.3 - Tipos de *fabrics* que ocorrem em carbonatos que sofreram recristalização segundo Friedman (1965), retirada de Flügel (2004).

2.1.5. Micritização

A micritização é um processo que consiste no preenchimento por micrite dos espaços vazios existentes nas partículas carbonatadas e/ou no revestimento destas por micrite.

Este é um processo comum que ocorre na diagénese precoce afectando grãos carbonatados e normalmente tem lugar em ambiente de fundo marinho raso ou um pouco abaixo disso (Macintyre *et al.* 2000; Reid & Macintyre, 2000; Swei & Tucker, 2012). Ocorre normalmente por duas vias: posteriormente às microperfurações realizadas por certos organismos, como cianofíceas e fungos, nas partículas carbonatadas, em que após o desaparecimento desses organismos, essas microperfurações são foco de preenchimento por micrite; ou devido à dissolução parcial dos fragmentos orgânicos em águas frias, em que se produz uma micrite composta por lamelas herdadas da concha original, com porosidade desenvolvida (e.g. Azerêdo, 1993).

A micritização é comumente descrita em ambientes lagunares de pequena profundidade onde o movimento é limitado. Por outro lado a micritização marinha microbiana pode ser importante na geração de microporosidade dentro de grãos (Fig. 2.4) (Volery, 2009; Swei & Tucker, 2012).

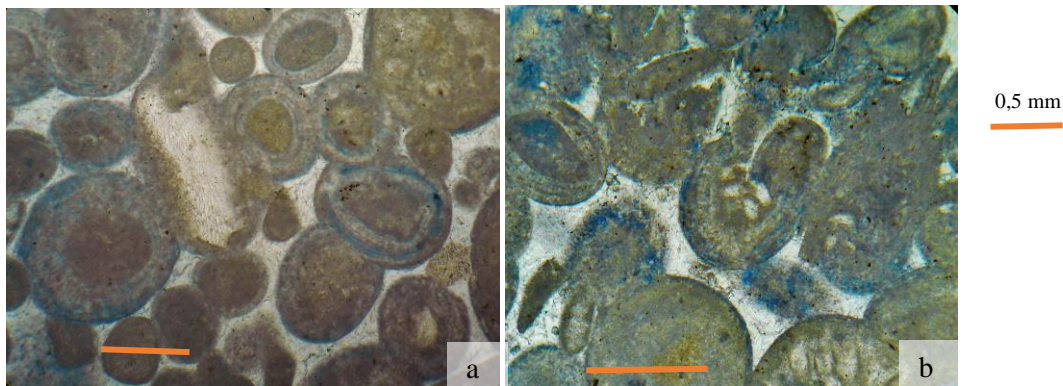


Fig. 2.4- Oóides micritizados como microporosidade do tipo intrapartícula a) lâmina E1 do presente trabalho b) lâmina F2.5 do presente trabalho.

2.1.6. Dolomitização/Desdolomitização

A dolomitização é um processo geoquímico, que especificamente consiste na substituição de calcite por dolomite. Por outras palavras, é o processo pelo qual um calcário e/ou o sedimento precursor é completamente ou parcialmente substituído por dolomite, podendo essa substituição ocorrer de modo pervasivo ou selectivo (*sensu* Murray & Lucia, 1967; Sibley, 1982 in Azerêdo., 1993).

Normalmente este processo é diferencial e localizado, levando em geral ao aumento de porosidade das rochas carbonatadas durante a diagénese (Adams *et al.* 1984; Mackenzie & Adams, 1994), havendo contudo excepções em que ocorre diminuição da porosidade.

Este processo pode também acontecer por precipitação de cimento nas rochas carbonatadas, ainda que mais raramente. A dolomitização pode ocorrer durante a diagénese precoce ou durante a diagénese tardia. Na diagénese precoce dá-se principalmente por precipitação e crescimento de cimentos laminares em forma de aros em torno das partículas, normalmente em ambiente inter-supratidal e/ou subtidal, enquanto que na diagénese tardia está geralmente relacionada com o soterramento profundo de calcários (Flügel, 2004).

As condições básicas para a ocorrência de dolomitização são, de acordo com Morrow, 1982; Machel & Mountjoy, 1986 in Azerêdo (1993): a disponibilização suficiente de Mg^{2+} e de CO_3^{2-} e /ou de HCO_3^- ; manutenção, por um longo período de tempo, de um mecanismo hidrológico que possibilite o influxo daqueles iões e a exportação de Ca^{2+} (eficácia do sistema de circulação); existência de sedimento carbonatado com uma determinada composição, porosidade e permeabilidade, entre outros aspectos, susceptível de sofrer dolomitização.

Os cimentos mais finos constituem um substrato mais propício ao desenvolvimento de cristais de dolomite, uma vez que apresentam uma cristalinidade mais fina e um maior número de núcleos, sendo desta forma mais facilmente activados por esta transformação mineralógica (Azerêdo, 1993).

Os clastos constituídos por cristais mais grosseiros (p.ex. bioclastos) apresentam pontos de cristalização mais espaçados do que os clastos formados por cristais menores, como sejam os oóides. Os clastos cuja composição inicial é aragonítica ou calcítico-magnésiana, são também mais facilmente dolomitizados (Azerêdo, 1993). O aumento da pressão e sobretudo da temperatura é favorável à precipitação de dolomite.

A dolomitização é caracterizada por fabrics característicos que foram definidos por Friedman (1965) como ilustra a figura seguinte (Fig. 2.5).

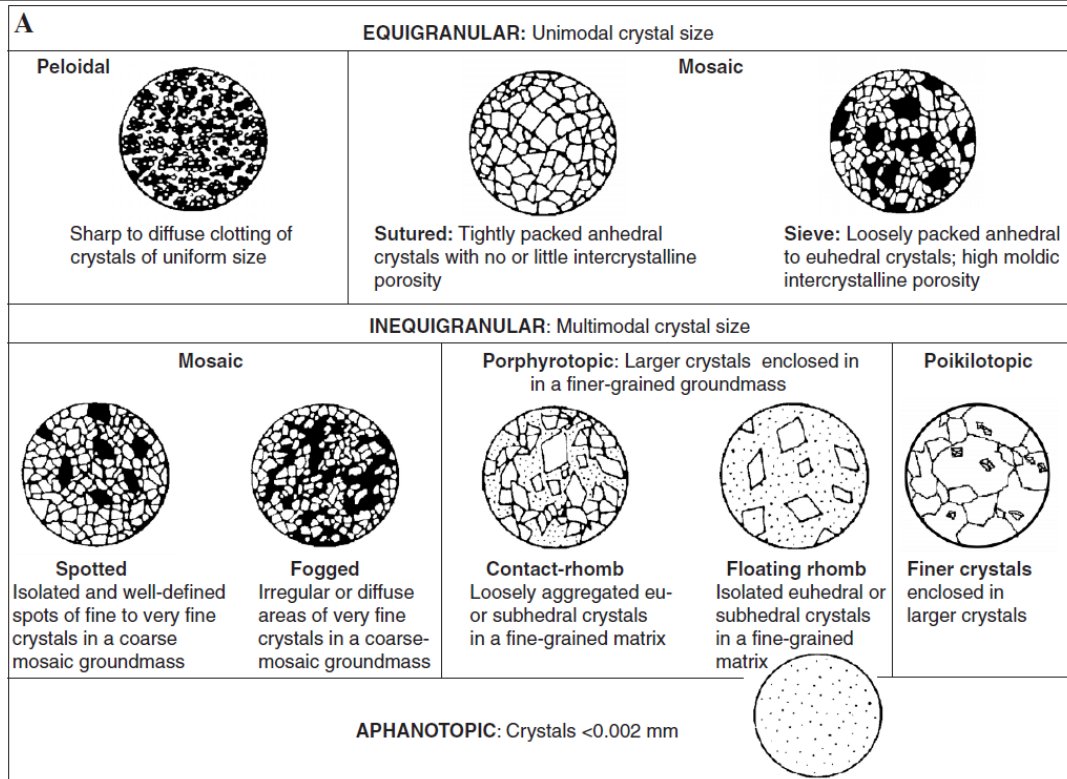


Fig. 2.5- Classificação de *fabrics* dolomíticos (Friedman 1965 in Flügel 2004).

A desdolomitização é o processo inverso à dolomitização, isto é, consiste na substituição da dolomite por calcite (Adams *et al.* 1984). Trata-se de um processo comum nas rochas carbonatadas que envolve soluções em que a relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ é elevada, dando-se a substituição da dolomite por calcite, levando a que grande parte dos cristais romboédricos dolomíticos da rocha inicial passem a ser de natureza calcítica (Azerêdo, 1993).

A desdolomitização ocorre, habitualmente, sob a influência de águas meteóricas (devido à sua acção oxidante) e/ou mistura de fluidos de composição diferente dentro de poros, recorrentemente resultando na formação de porosidade secundária (Flügel, 2004). A desdolomitização durante a diagénese precoce pode ser resultante da instabilidade da dolomite e da calcite magnesiana que facilita a substituição dos núcleos dos romboedros de dolomite por calcite; da recristalização perto da superfície em condições meteóricas e da dissolução meteórica de romboedros com posterior preenchimento por cimentos granulares (Flügel, 2004). A ocorrência de desdolomitização durante a diagénese tardia é controlada pela variação da salinidade da água presente nos poros da rocha durante o soterramento; estas variações da salinidade podem resultar de vários factores, tais como: instabilidade diagenética de calcite/dolomite ou corrosão de romboedros zonados ao longo dos planos de clivagem, com

formação de poros intracristalinos e mais tarde com crescimento de calcite sintáctica dentro desses poros.

As principais marcas/produtos diagenéticos da dolomitização/desdolomitização são apresentados abaixo (Tab.2.4):

Produtos diagenéticos da dolomitização

Fabrics dolomíticos característicos (Fig 2.5); Cristais romboédricos, turvos; frequentemente preenchimento por betume e/ou óxidos de Ferro; luminescência fraca, vermelho escuro, com zonação vaga, ou laranja-castanho nos cristais mais truvos (observável com recurso a catodoluminescência); crescimento de cristais de dolomite nas paredes de poros tipo Vug; texturas “fantasmas” (visualização da forma de elementos aloquímicos numa matriz dolomitizada).

Produtos diagenéticos da desdolomitização

Cristais romboédricos com sparite grosseira no interior (Fig.2.6) ou com pequenas cristais de calcite em mosaico, podendo neste caso exibir texturas internas heterogéneas; diluição dos contornos dos romboedros com preservação dos centros turvos e textura grumosa; inclusões de óxidos de ferro; precipitação de cimento calcítico, principalmente nos vugs e fracturas existentes; fissuras preenchidas por calcite ferrosa de coloração lilás; inclusões de quartzo autigénico.

Tab 2.4 – Marcas/produtos diagenéticos característicos da dolomitização e desdolomitização. Adaptado de Adams *et al.* (1984), Varol & Margaritz (1991) e Azerêdo (1993)

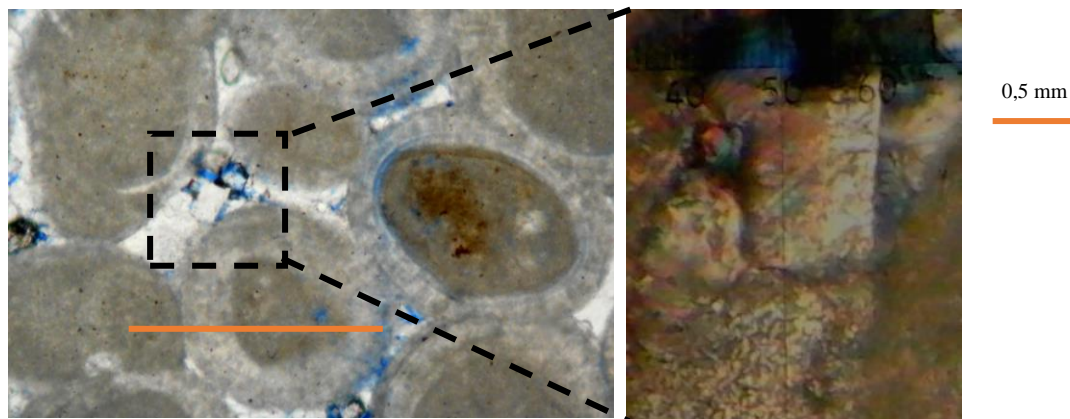


Fig. 2.6 – Cristal romboédrico que sofreu desdolomitização (lâmina F2 do presente trabalho)

2.2. Ambientes diagenéticos carbonatados

Existem três principais ambientes diagenéticos: ambiente meteórico (vadoso e freático), ambiente marinho (vadoso e freático) e ambiente de soterramento (Fig. 2.7).

Estes ambientes podem passar, vertical e/ou lateralmente de uns para os outros ao longo da evolução diagenética, sob condições físicas e químicas que se vão alterando gradualmente consoante os ambientes e os processos diagenéticos actuantes. Estas passagens devem-se principalmente à ocorrência de flutuações do nível do mar, movimentos tectónicos e/ou aumento ou diminuição do soterramento (Flügel, 2004).

Os diversos ambientes podem ser identificados através da observação dos vários tipos de cimento, assim como, através dos tipos de processos que actuaram durante a evolução diagenética da rocha ao longo da sua história geológica. Ao mesmo tempo demonstra a relação existente entre cada ambiente e os produtos resultantes da actuação dos vários processos diagenéticos ocorridos.

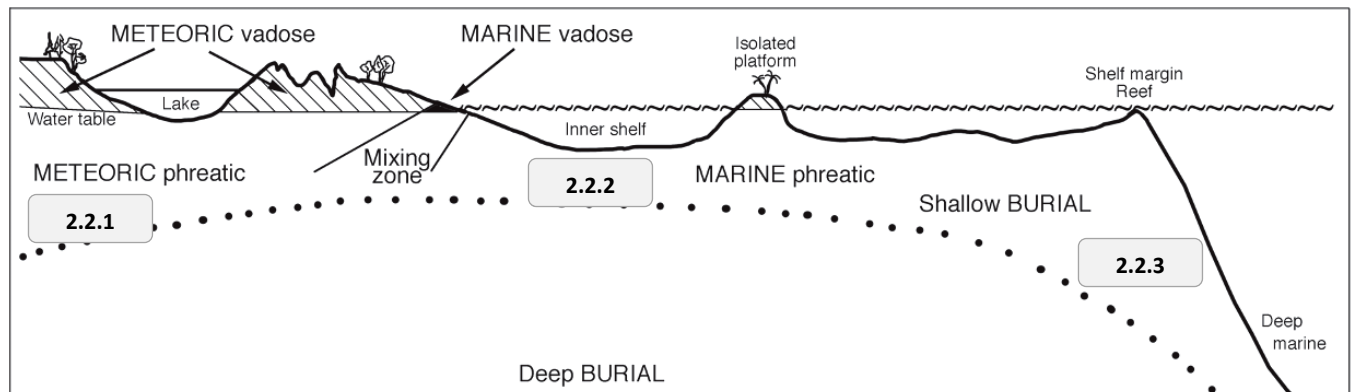


Fig. 2.7- Esquematização dos ambientes diagenéticos (Flügel, 2004).



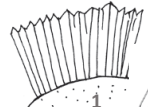


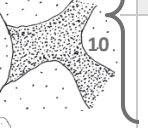
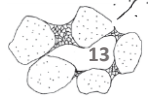




2.2.1. Ambiente Meteórico

A diagénese em ambiente meteórico é comum, uma vez que a maioria dos carbonatos se formam em ambiente marinho de pequena profundidade, sendo quase inevitável que estes sofram exposição sub-aérea por pequenas e rápidas descidas do mar (Wright, 1991; Moore, 2001). Os principais processos diagenéticos que ocorrem neste ambiente são a dissolução e a cimentação.

A dissolução e criação de alta porosidade é originada pela sub-saturação e forte agressividade das águas meteóricas. A “agressividade” destas águas resulta da elevada concentração de CO_2 (pCO_2), que foi adquirido não só nos reservatórios atmosféricos como nos ácidos orgânicos presentes nos solos da zona vadosa (Morse & Mackenzie, 1990) e das reacções de decaimento existentes nas águas freáticas.

As interacções do fluido meteórico com o sedimento, alteram rapidamente o estado de saturação e a solução que daí resulta pode precipitar na forma de cimento. Baixas razões de Mg/Ca e salinidades vão favorecer a precipitação de calcite havendo uma forte possibilidade de ocorrer cimentação calcítica.

O ambiente meteórico normalmente divide-se em zonas insaturadas (vadoso) e saturadas (freático) separadas por um lençol de água. A interface entre fluidos meteóricos superficiais e poros preenchidos por outro tipo de fluidos (p.ex: água do mar) são zonas de mistura que podem ter características diagenéticas especiais. As características destes ambientes bem como as marcas/produtos diagenéticos mais comuns são apresentados na tabela abaixo (Tab. 2.5).

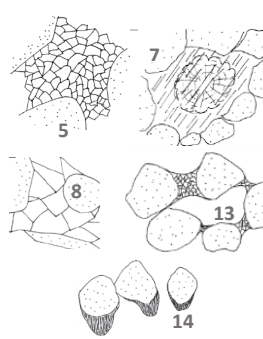
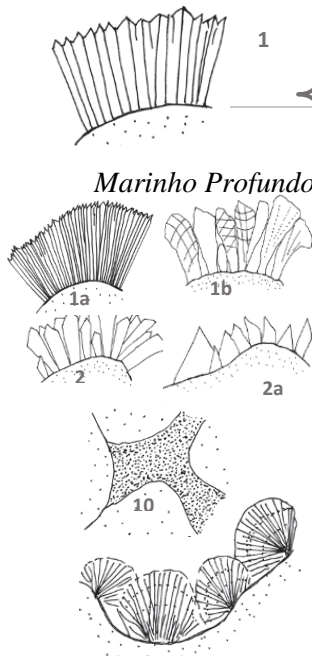
<i>Tipo de ambiente</i>	<i>Características do ambiente</i>	<i>Produtos diagenéticos mais comuns</i>
  <u>Meteorico Vadoso</u>	<p>Ambiente com interacção água/ar, podendo os poros estar preenchidos por água doce e /ou ar, devido a variações sazonais.</p> <p>Cimentação em pequena quantidade</p>	<p>Remoção da aragonite; porosidade do tipo vacuolar (<i>vug</i>); <u>Tipos de cimento</u>: fibroso (1), radial (1b), laminar (2), dente de cão (2a), crescimento de calcite microcristalina (10) e menisco (13). <u>Tipos de Fabric</u>: gravitacional, circumgranular, sintáxico, drúsico e por vezes granular (5) e equicristalino; ocorrência de desdolomitização e formação de calcite porosa, podendo levar a preservação ou mesmo ao aumento da porosidade.</p>
     <u>Meteorico Freático</u>	<p>Ambiente caracterizado pela saturação permanente dos poros das rochas por água doce e cimentação rápida. Os cimentos precipitados apresentam baixos teores de Mg (baixos teores de Mg/Ca na água meteórica e que consequentemente levam à dissolução de aragonite e cimentação com baixo Mg).</p> <p>Pode ser subdividido, numa parte superior (zona activa) onde há circulação de água normalmente saturada em CaCO_3 e numa parte inferior em condições de estagnação. Na parte inferior dá-se menos dissolução e precipitação de cimento, podendo ser preservada a porosidade primária</p>	<p>Dissolução da aragonite e calcite magnesiana. Geração de porosidade móldica e <i>vug</i>. <u>Tipos de cimento</u>: fibroso (1), dente de cão (2a), <i>blocky</i> (9), microcristalino (10), pelóidico (11), menisco (13) e pendente (14). O tamanho dos cristais de cimento é superior do que em ambiente vadoso. <u>Tipos de Fabric</u>: circumgranular, isópaco, gravitacional, equicristalino, granular (5) e mosaico (8), crescimento sintáxico (7) (cimento sintáxico com inclusões).</p>
    <u>Zona de Mistura</u>	<p>Ocorre geralmente em estratos ou camadas mais porosas e/ou permeáveis situadas próximas de zonas costeiras. Esta mistura é essencialmente devida à alta velocidade de descarga de fluxo do lençol de água proveniente das zonas continentais próximas do ambiente marinho. A mistura de águas de composição química diferente tem um elevado potencial ao nível da actividade geoquímica, funcionando como um catalisador para a ocorrência de vários processos diagenéticos nessa área.</p>	<p>Precipitação de aragonite e de cimento dolomítico, ocorrência de dolomitização selectiva e/ou pervasiva das rochas, precipitação de cimentos em menisco (13).</p>

Tab 2.5 – Ambiente meteórico vadoso, freático e de mistura – características do ambientes e marcas/produtos diagenético mais comuns desses ambientes. Adaptado de Flügel (2004).

2.2.2. Ambiente Marinho

É definido como ambiente margino-marinho em condições de saturação da rocha por água marinha. No oceano actual, a cimentação marinha dá-se em dois ambientes: ambiente marinho pouco profundo e ambiente marinho profundo/freático (Moore, 2001; James & Choquette, 1990).

Uma vez que, na sua maioria, os carbonatos são depositados em ambientes marinhos e os poros da rocha se encontram por isso saturados em água marinha, a diagénese começa praticamente após a sua deposição. Os produtos diagenéticos e características dos ambientes marinhos encontram-se na tabela abaixo (Tab.2.6)

<i>Tipo de ambiente</i>	Características do ambiente	Produtos diagenéticos mais comuns
 <p><i>Marinho Pouco Profundo</i></p>	<p>Ambiente altamente energético e com forte influência de correntes, de profundidade variável (entre a zona intertidal e 100m de profundidade). Caracterizado por uma rápida acumulação de sedimentos, sendo sobressaturado em CaCO_3 (e ricos em Mg) em ambientes tropicais e subtropicais, potenciando ocorrência de cimentação.</p> <p>Este domínio pode ser subdividido e 3 zonas: 1) ambiente marinho activo (zonas rasas), onde os poros estão saturados em água e ocorre cimentação rápida (aragonite em franja e calcite rica em Mg) ou presença de vários tipos de cimento (eg.: recifes); 2) ambiente marinho estável – movimento dos fluidos é pobre, grãos sofrem micritização microbiana e a cimentação é limitada (eg.: lagunas carbonatadas); 3) marinho vadoso, cimentação ocorre por evaporação da água do mar, maioritariamente, podendo haver efeitos microbianos (eg.: praias e zonas de rebentação)</p>	<p><u>Tipos de Cimento:</u> fibroso (1), menisco (13), pendente (14).</p> <p><u>Tipos de fabric:</u> isópaco, gravitacional, menisco, granular (5), mosaico (8), crescimento sintáxico (7).</p>
 <p><i>Marinho Profundo</i></p>	<p>Caracterizado por acumulação de sedimentos lenta, resultante do afundamento de carapaças calcárias de plâncton e presença de águas frias subsaturadas em CaCO_3, levando à ocorrência de dissolução de aragonite e calcite no talude continental devido ao decréscimo de temperatura e aumento da pressão. A dissolução é crescente até se atingir o nível de compensação dos carbonatos (nível a partir do qual a aragonite e calcite são dissolvidos na totalidade).</p> <p>A cimentação é rara neste domínio.</p>	<p><i>Hardgrounds.</i> Micritização.</p> <p><u>Tipos de Cimento:</u> fibroso(1), acicular (1a), radialaxial (1b), laminar (2), dente de cão (2a), botroidal (3), microcristalino (10).</p> <p><u>Tipos de Fabric:</u> circumgranular, isópaco, crostas, botroidal, <i>splays</i>.</p>

Tab. 2.6 – Ambiente marinho pouco profundo e ambiente marinho profundo (freático) – características do ambiente e marcas/produtos diagenético mais comuns. Adaptado de Flügel (2004); Tucker & Wright (1990) e James & Choquette (1990).

2.2.3. Ambiente de Soterramento

Trata-se de um ambiente de alta profundidade, caracterizado pelo aumento progressivo da temperatura e da pressão litostática devido à sobrecarga dos sedimentos posteriormente depositados. Tal provoca a ocorrência de transformações acentuadas nos sedimentos carbonatados.

Neste ambiente actuam principalmente a dissolução e a compactação, podendo também ocorrer cimentação e dolomitização. Estes processos operam num intervalo considerável de profundidade, pressão e temperatura, na presença de fluidos intersticiais que podem ter várias origens, fluxos e/ou composições químicas diferentes, e que levam à diminuição da espessura das camadas e à formação de texturas e de tipos de cimentos específicos deste ambiente. Os produtos diagenéticos mais comuns do ambiente de soterramento estão descritos na tabela (Tab. 2.7).

A ocorrência de dissolução das partículas das rochas é uma fonte significativa de CaCO_3 para a cimentação posterior e/ou dolomitização durante o soterramento.

A dissolução sob pressão deve-se sobretudo ao aumento da solubilidade do material resultante da compactação que leva a um aumento da força aplicada no contacto entre as partículas. A compactação que é exercida neste tipo de ambiente geralmente provoca a ruptura, achatamento e distorção das partículas e uma redução significativa da porosidade e da permeabilidade, juntamente com cimentação.

Os cimentos calcínicos precipitados em fase de enterramento correspondem a calcite pouco magnésiana. A maioria dos cristais de cimento crescem devagar e por isso estão, relativamente, livres de imperfeições e lípidos quando comparados com os cimentos formados em ambiente marinho e meteórico. Grande parte dos cimentos neste ambiente formam-se a partir de fluidos redutores, e por isso podem ter conteúdos elevados de Fe^{2+} e Mn^{2+} . As morfologias dos cimentos são também muito influenciadas por essa natureza química dos fluidos, nomeadamente a sua quantidade em Ferro, dado que a presença elevada desse elemento leva à ocorrência de padrões de zonamento em alguns cristais. A porosidade nas rochas carbonatadas de uma forma geral diminui com o aumento da profundidade, como resultado principalmente de compactação e de cimentação; no entanto, pode ser criada porosidade em profundidade através da dissolução e/ou até por compactação, devido à ocorrência de fracturas individuais e/ou famílias de fracturas

(Flügel, 2004). Outros aspectos a ter em conta na avaliação das modificações tardias de porosidade por dissolução e cimentação são: a degradação térmica de hidrocarbonetos e o lento fluxo de fluidos conatos (fluidos bacinais) durante o soterramento progressivo (Flügel, 2004).

Tipo de ambiente

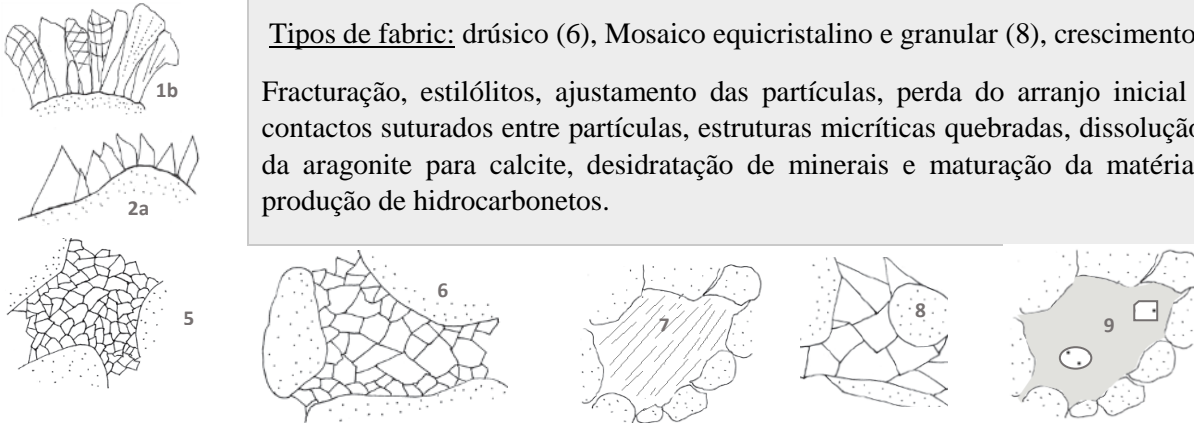
Produtos diagénéticos mais comuns

Soterramento

Tipos de cimento: radiaxial (1b), dente de cão (2a), *blocky* (5), poiquilotópico (9).

Tipos de fabric: drúsico (6), Mosaico equicristalino e granular (8), crescimento sintáxico (7).

Fracturação, estilólitos, ajustamento das partículas, perda do arranjo inicial das partículas, contactos suturados entre partículas, estruturas micríticas quebradas, dissolução e substituição da aragonite para calcite, desidratação de minerais e maturação da matéria orgânica com produção de hidrocarbonetos.



Tab. 2.7- Marcas/produtos diagénéticos mais comuns do ambiente de soterramento. Adaptado de Flügel (2004)

2.3. Fases diagénéticas: eodiagéne, mesodiagéne e telodiagéne

A eodiagéne é a fase mais precoce da diagénese na qual os processos pós-deposicionais são significativamente afectados pela proximidade à superfície, sendo caracterizada pelos processos diagénéticos actuantes ocorrerem durante um intervalo de tempo relativamente curto, num período de tempo compreendido entre a deposição dos sedimentos e o seu soterramento. Durante esta fase o quimismo da água contida nos poros inicialmente domina grandemente as reacções (Ali *et al.* 2010).

O limite superior da zona activa da eodiagéne corresponde à interface subaérea ou subaquática, enquanto que o seu limite inferior situa-se na zona/área onde as águas meteóricas provenientes da superfície e/ou águas marinhas deixam de circular pela gravidade e/ou por convecção (Flügel, 2004).

Os minerais quimicamente instáveis constituintes do sedimento sofrem, nesta fase, transformações acentuadas, que podem levar à criação de porosidade principalmente, devido à ocorrência de dissolução ou à dolomitização, por outro lado, pode ocorrer redução da porosidade por cimentação. Normalmente na eodiagéne a porosidade é moderada a alta.

Nesta fase existe também uma maior influência orgânica, isto é, podem existir na rocha marcas de perfuração, bioturbação, penetração de raízes e decomposição de matéria orgânica.

A mesodiagénese é por vezes denominada de diagénese de enterramento, não sendo já dominada por processos directamente relacionados com a superfície.

A ocorrência dos processos diagenéticos nesta fase é influenciada por: extensão e distribuição das alterações ocorridas na eodiagénese, quimismo dos fluidos existentes no interior dos poros da rocha, tempo de residência e regime de fluxo desses fluidos, condições de temperatura e pressão (que podem levar à degradação termal de hidrocarbonetos e ao fluxo lento de fluidos basinais durante o soterramento progressivo).

Esta etapa diagenética é caracterizada fundamentalmente pela destruição da porosidade e da permeabilidade, principalmente por compactação e cimentação. Podem existir situações em que há geração de porosidade, devido à ocorrência de dolomitização e/ou a geração de fracturação durante a compactação da rocha ao longo do soterramento.

A telodiagénese é a fase mais tardia da diagénese. Este termo refere-se às mudanças durante o intervalo em que rochas há muito soterradas são afectadas por processos associados com o *uplift* (levantamento) e erosão. A porosidade resultante da telodiagénese está fortemente associada a desconformidades (Ali *et al.* 2010), sendo principalmente porosidade cavernosa, por brechificação e de fractura.

A meteorização física sofrida ocorre principalmente por: expansão e contracção de origem térmica, crescimento de cristais no interior da rocha, dilatação devida a descompressão e actividade biológica; enquanto que a meteorização química (decomposição de minerais quer por dissolução, quer por transformação noutros minerais) ocorre por: dissolução e carbonatação, hidratação, hidrólise e carbonatação, oxidação e/ou influências biológicas na meteorização química/meteorização bioquímica (Cabral, 2004).

Os principais factores que controlam a ocorrência e distribuição das alterações ocorridas nesta fase são: a composição mineralógica da rocha, o grau de fracturação (como por exemplo: presença de descontinuidades geológicas que se estendam até à, ou próximo, da superfície permitindo a percolação de fluidos e servindo como condutores de água meteórica), o gradiente hidráulico (que depende do grau de emersão das rochas em relação ao nível do mar), o grau de

perda de porosidade e permeabilidade durante a eodiagénese e mesogénese, a presença ou ausência de espessas camadas de argilas e/ou outras rochas impermeáveis que dificultem a infiltração de água meteórica, a duração da exposição, o clima e a temperatura à superfície.

A imagem (Fig. 2.8) abaixo ilustra as três fases diagenéticas e a sua relação em profundidade e o gráfico mostra a porosidade formada e/ou destruída ao longo das diferentes fases diagenéticas ao longo do tempo geológico (Fig. 2.9).

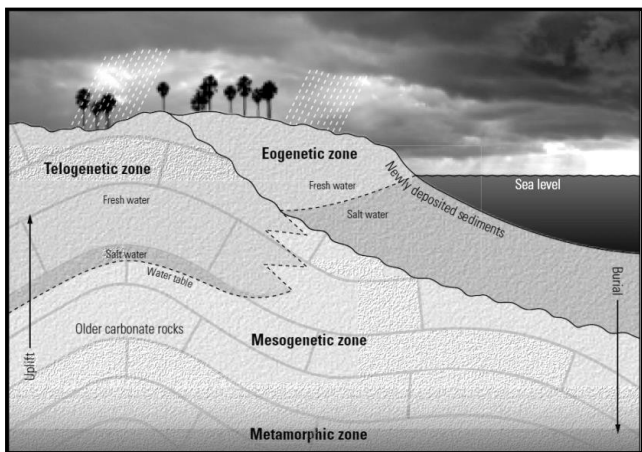


Fig. 2.8 – Regimes diagenéticos (adaptado de Mazzullo, 2004 in Ali *et al.* 2010).

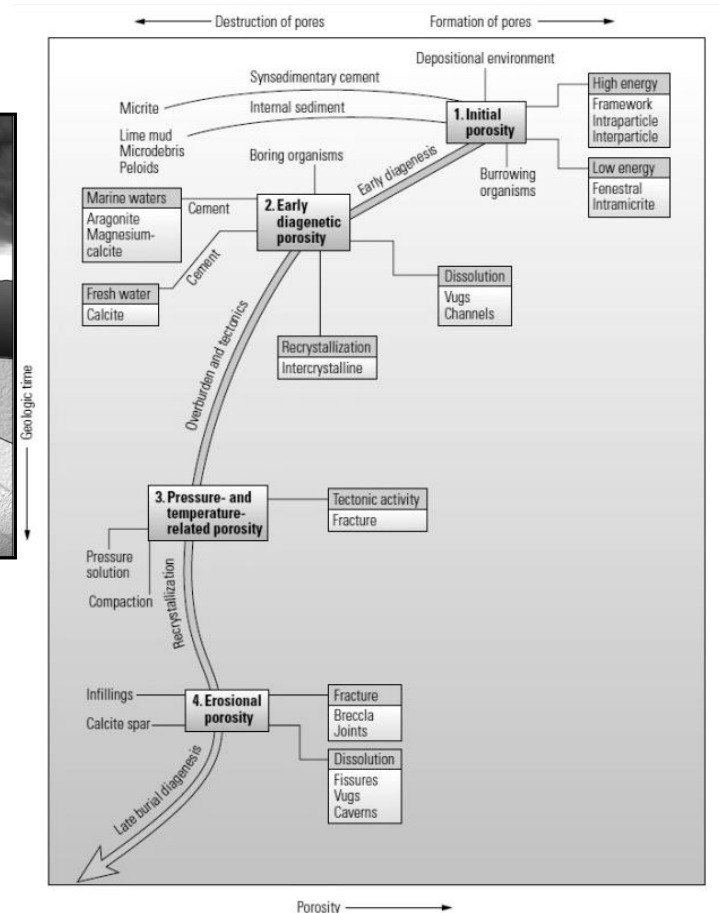


Fig. 2.9 – Porosidade nos carbonatos ao longo do tempo geológico. Adaptado de Akbar *et al.* 1994 in Ali *et al.* 2010.

3. Enquadramento geográfico e geológico

3.1. Enquadramento da área de estudo

A secção estudada (Fig. 3.1 e 3.2) localiza-se na região do Vale Florido, no planalto de Sto. António na Serra dos Candeeiros - Folha 27-C, Torres Novas, da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000. Do local estudado foi depois criado um modelo cujas dimensões (x,y,z) são cerca de 254 x 194 x 20m.

O afloramento em estudo pertence à Formação de Santo António e Candeeiros (Membro de Codaçal), de idade batoniana, que segundo Azerêdo (2007) nesta zona ocorre entre a Serra de Santo António e o dorso da serra de São Bento, com expressão cartográfica desde Cabeço Vedeiro até ao limite Sul da carta, prolongando-se desde a Folha 27-A (Vila-Nova de Ourém) até a Folha 27-C (Torres Novas).

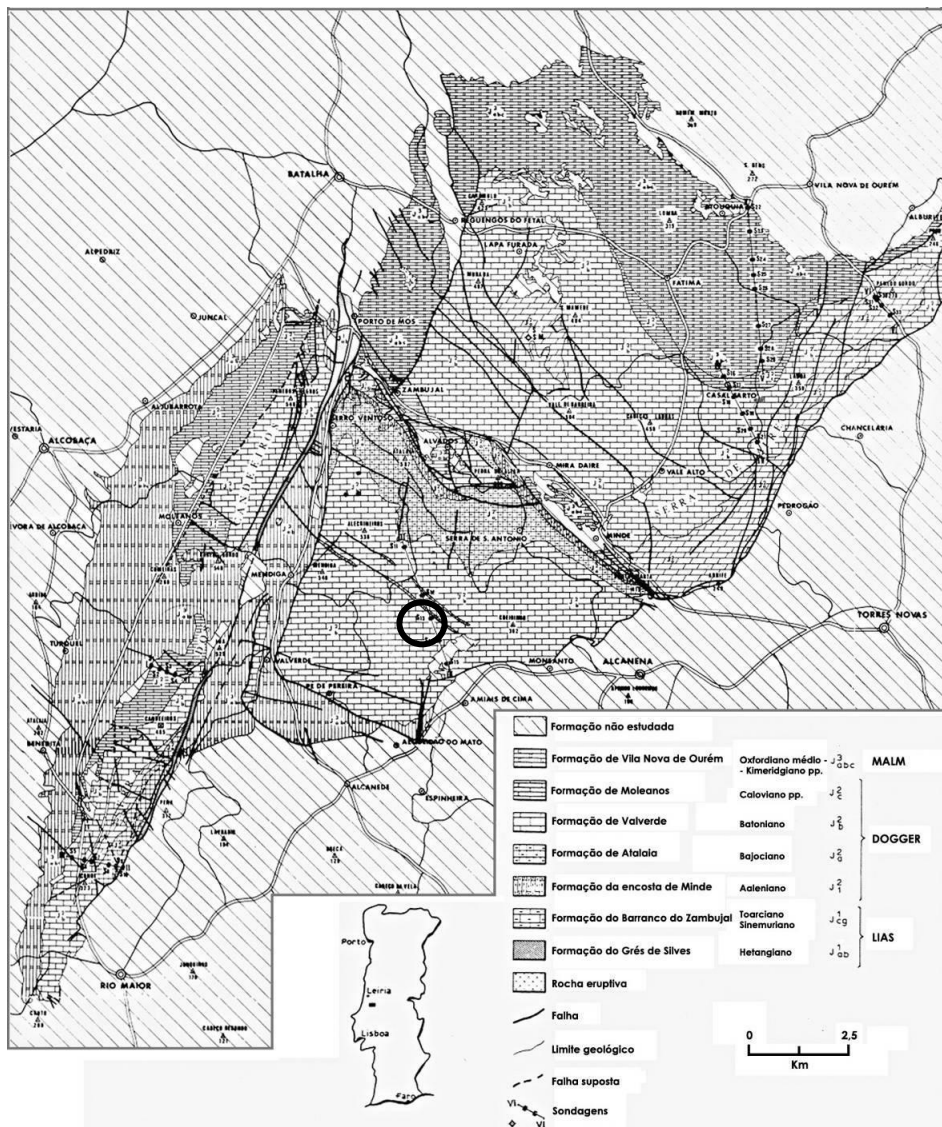


Fig. 3.1 – Carta geológica e litológica do Maciço Calcário Estremenho (Manuppella *et al.* 1985) com a localização da zona em estudo marcada a preto.

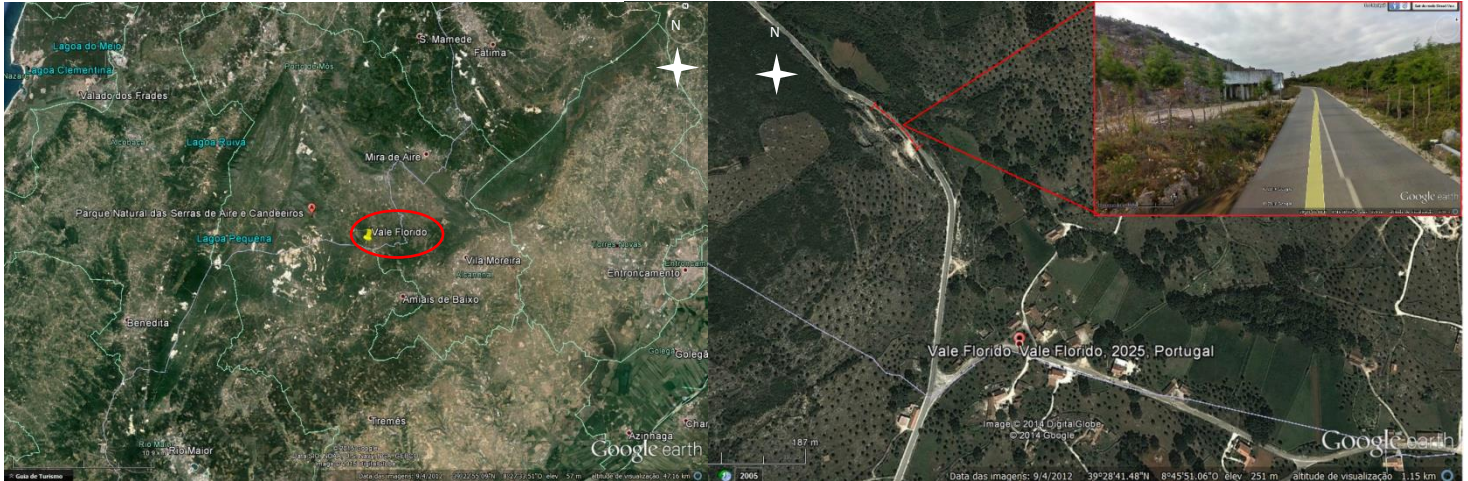


Fig. 3.2 – Localização geográfica do afloramento em estudo na Serra de Aire e Candeeiros, Vale Florido. Imagem retirada do Google Earth.

3.2. Bacia Lusitânica

A Bacia Lusitânica é uma bacia sedimentar situada na margem Oeste Ibérica tendo-se formado durante um evento de *rifting* que levou à abertura do oceano Atlântico Norte. Esta bacia tem cerca 100 km de largura e 200 km de extensão e a sua área *onshore* é de cerca de 23 000 km² (Wilson, 1988; Kullberg, 2000).

O enchimento sedimentar da bacia vai do Triásico Superior ao Cretácico Superior, sendo a maioria desse enchimento do Jurássico. A evolução desta bacia pode ser dividida em 4 principais eventos geodinâmicos, segundo diversos autores (e.g. Kullberg *et al.* 1997; Rasmussen *et al.* 1988; Kullberg, 2000): 1) *rifting* do Triásico superior, aquando da fragmentação da Pangeia e esboço de abertura do Atlântico; 2) segundo episódio de *rifting* que se prolongou do Jurássico superior ao Cretácico inferior, correspondendo ao evento de *rifting* principal que leva à abertura do oceano Atlântico Norte (Wilson *et al.* 1988); 3) rotura (*break-up*) em três fases e deriva: a primeira etapa foi do Jurássico superior – Berriasiano, e as outras duas deram-se no Cretácico inferior. Devido a isso a desconformidade é diacrónica; 4) inversão da bacia provocada pela colisão das placas Africana e Euroasiática e que levou ao encurtamento do soco (Ribeiro *et al.*, 1996).

Após a primeira fase de *rifting* (Triásico) ocorreu sedimentação crescentemente marinha, essencialmente calcários e margas de ambientes pouco profundos a profundos, dolomitos e argilitos betuminosos (Jurássico Inferior e Médio), desenvolvidos num sistema deposicional de

rampa carbonatada (Duarte & Soares, 2002; Azerêdo, 2013). O Jurássico Médio é separado do Jurássico Superior por uma desconformidade notável (e.g. Azerêdo *et al.* 2002).

3.2.1. Aspectos litostratigráficos e sedimentares gerais do Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (MCE)

O Maciço Calcário Estremenho (MCE) é uma unidade geomorfológica de forma rômbrica, alongada na direcção NE-SW. O MCE é constituído por formações carbonatadas do Jurássico, predominantemente do Jurássico Médio, que está representado por todos os seus andares.

As unidades do Jurássico Médio são maioritariamente composta por calcários, a que se associam calcários dolomíticos, dolomitos e, apenas na parte inferior da série, calcários margo-argilosos e margas. Esta série inclui sobretudo fácies marinhas internas, representadas por depósitos de alta energia (calcários oolíticos e bioclásticos com estratificação oblíqua, calcários calciclásticos maciços, biostromas) gerados num paleoambiente de ilhas-barreira, depósitos lagunares e depósitos perimareais (calcários micríticos e oncolíticos, dismicrites, dolomicrites, calcretos), formados nas áreas protegidas antebarrreira interna; com menor expressão, ocorrem fácies de meio marinho aberto (Azerêdo, 2007).

O modelo deposicional proposto para estas formações, no contexto global do registo estratigráfico do Jurássico Médio da Bacia Lusitânica, é o de um sistema de rampa carbonatada, inclinando de leste/sudeste para oeste/noroeste (Watkinson, 1989; Azerêdo, 1993, 1998) tendo sido favorecido por condições de relativa estabilidade tectónica, taxa de subsidência baixa e aproximadamente homogénea, tendência dominante de subida do nível do mar, clima subtropical e substrato de topografia suave mais ou menos uniforme.

A parte inferior do Jurássico Médio (Aaleniano e Bajociano) é caracterizada por deposição dominante de fácies de meio marinho externo na generalidade da bacia mas, gradualmente, ao longo do intervalo em causa, vai sendo mais significativa a ocorrência de fácies de média/pequena profundidade (Fig. 3.3).

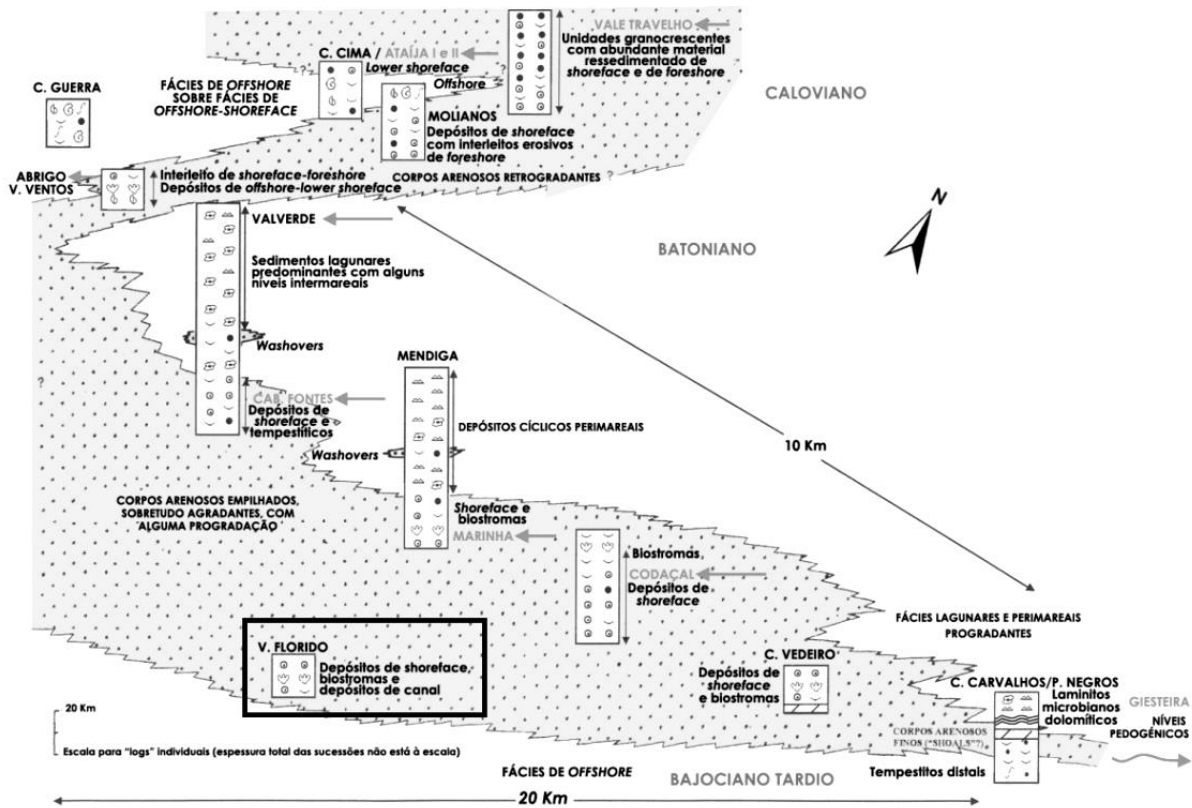


Fig. 3.3.— Diagrama regional simplificado das séries do Maciço Calcáreo Estremenho, do Bajociano superior ao Caloviano, mostrando a dinâmica dos padrões de fácies e a sua interpretação. Estas séries ilustram as principais fases evolutivas da rampa carbonatada que caracterizava a bacia, no Jurássico Médio (Azerêdo, 1998 redesenhado em Pimentel, 2005). Foram assinalados na imagem os depósitos em estudo.

Para o MCE foram formalmente definidas por Azerêdo (2007) 5 Formações, para o topo do Jurássico Inferior e Jurássico Médio (Fig. 3.3): Formação da Fórnea, Formação de Barranco do Zambujal, Formação de Chão das Pias (subdividida em 2 Membros), Formação de Serra de Aire e a Formação de Santo António-Candeeiros (subdividida em 3 Membros). É nesta última formação que se inserem as unidades estudadas neste trabalho.

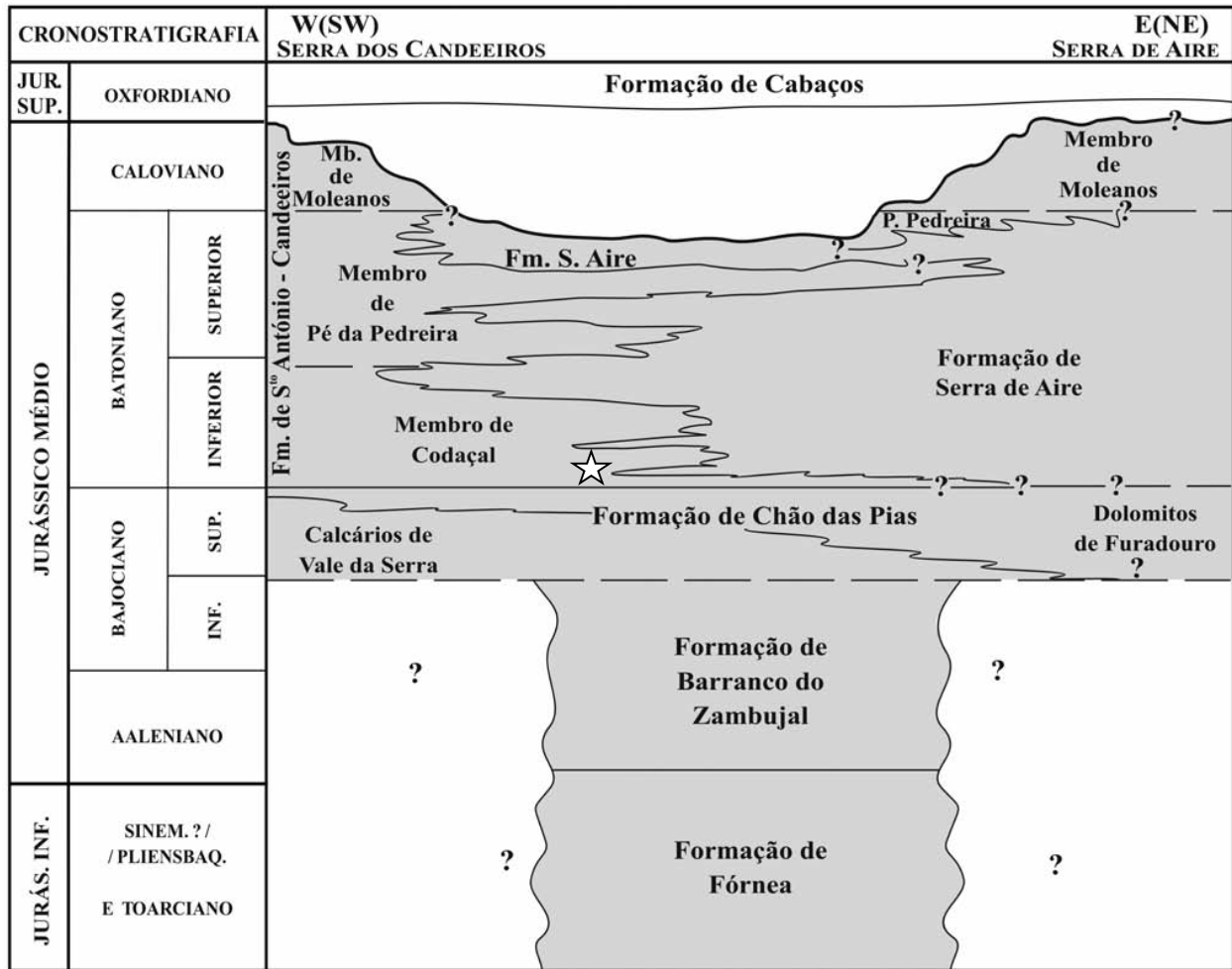


Fig. 3.4 – Unidades litostratigráficas formais para o Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho. Retirado de Azerêdo (2007). Foi assinalado o membro a que pertence a secção em estudo.

3.2.2 Aspectos tectónicos do MCE

A tectónica presente no MCE, é na sua maior parte, herdada das estruturas originadas durante a orogenia varisca, que afectou Portugal durante o Paleozoico. A tectónica é muito influenciada pela deposição da formação da Dagorda no Hetangiano, que funcionou como base do descolamento entre o soco paleozoico e as rochas meso-cenozoicas durante os episódios de extensão alpina (e.g. Kullberg *et al.* 2006). Nos locais onde estes depósitos evaporíticos têm uma pequena espessura, a reactivação dos acidentes variscos corta toda a sequência mesozoica como falhas normais. Nos locais onde a espessura é elevada, as falhas não se prolongam para a superfície. Antes surgiram novas falhas normais acima da sequência evaporítica, a mimetizar as subjacentes. Verifica-se, assim, a conjugação de tectónica de soco com tectónica *thick-skinned* and *thin-skinned* (Kullberg, 2000; Carvalho, 2013). Durante os episódios de compressão alpina as estruturas passaram a ter movimentação inversa e desligante.

Os acidentes tectónicos que dominam o MCE correspondem a três famílias de falhas, cujas direcções são respectivamente: NNE-SSW, NW-SE e NE-SW (Fig. 3.5).

A primeira família de falhas (NNE-SSW) é a que ocorre mais frequentemente, integrando 4 grandes falhas: a falha dos Candeeiros que limita, a Oeste, a Serra com o mesmo nome, a falha de Rio Maior – Porto de Mós que limita essa serra do lado oriental, e o sistema constituído pela falha da Mendiga (no bordo ocidental do Planalto de Sto. António) e pela falha de Reguengo do Fetal (no bordo ocidental do Planalto de São Mamede). Estes acidentes tectónicos terão funcionado com falhas normais durante o Mesozoico, e algumas terão sofrido inversão no decorrer do Cenozóico (e.g. Carvalho, 2013).

As Falhas NW-SE, essencialmente representadas pelas falhas de Alvados e Minde (interligadas na região de Alvados) e que limitam uma zona deprimida, funcionaram também como falhas normais durante o período distensivo do Mesozoico, no entanto, a sua actividade terá levado a uma estruturação em *roll over* do bloco a tecto (planalto de São Mamede), tendo sido posteriormente reactivado como rampa lateral dextrogira do Cavalgamento do Arrife, durante a fase de inversão (Manuppella *et al.*, 2000). Esta família de falhas está ainda representada por acidentes que compartimentam os dois planaltos (Planalto de Sto. António e planalto de São Mamede), existindo por vezes intrusões de rochas doleríticas, constituindo um dos traços

distintivos do MCE segundo Wilson *et al.* (1989). Após a compressão miocénica, terão sido reactivados como desligamentos direitos (Pinheiro *et al.*, 1996).

A terceira família de falhas, de direcção NE-SW, encontra-se representada essencialmente pela falha de Arrife, que limita o MCE a SE. Esta falha terá sido reactivada como cavalcamento vergente para SE durante a compressão alpina (Kullberg, 2000; Manuppella *et al.*, 2000; Carvalho, 2013).

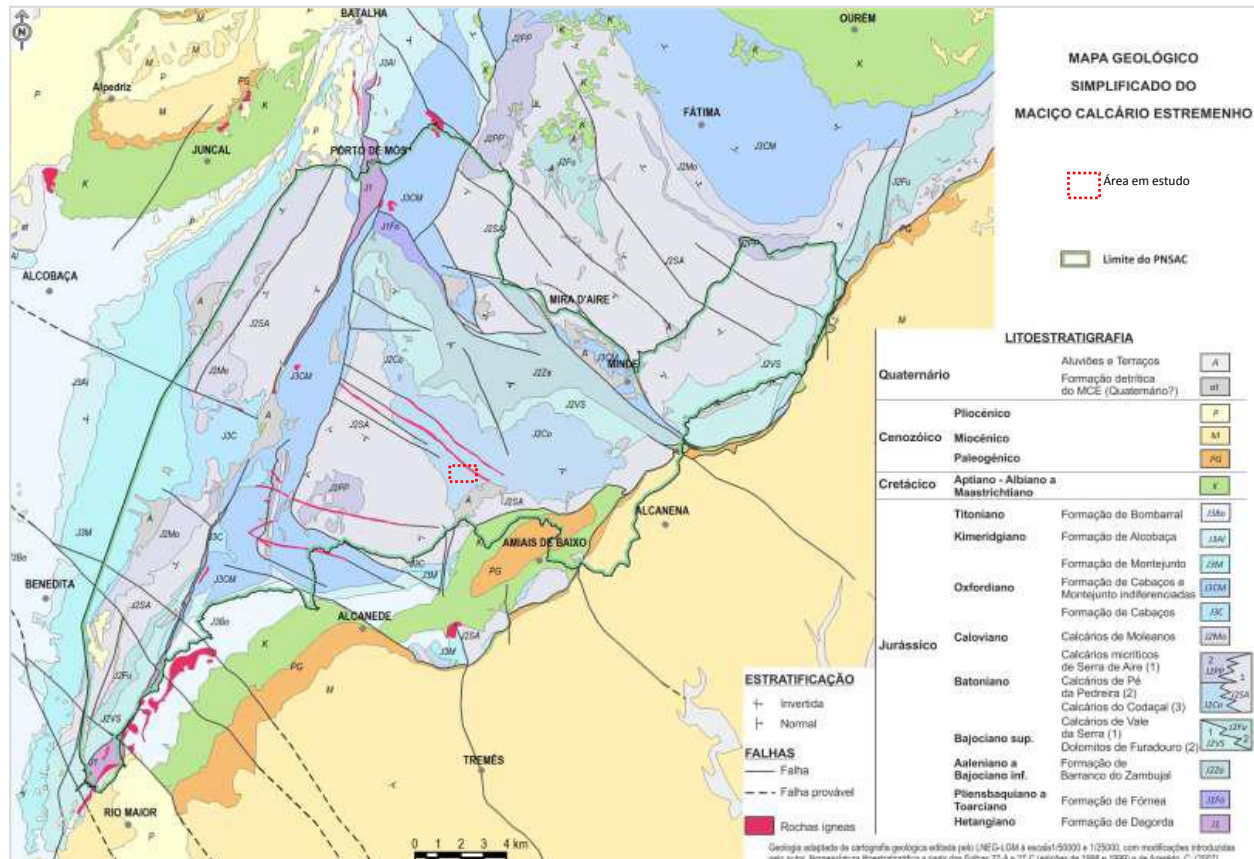


Fig. 3.5 – Mapa geológico simplificado. Retirado de Carvalho *et al.* (2011)

3.2.3 Formação Santo António - Candeeiros, Membro de Codaçal

A Formação Santo António - Candeeiros é composta por uma espessa sucessão (de espessuras que podem atingir no seu máximo 500m) de calcários formados em condições deposicionais de alto hidrodinamismo (Fig 3.6), nomeadamente calcários oolíticos e bioclásticos com estratificação oblíqua de vários tipos (Fig 3.7), correspondendo a um sub-ciclo transgressivo de 2ª ordem segundo Azerêdo *et al.* 2014 (Fig. 3.8). Na sua maioria estes depósitos constituem corpos arenosos empilhados; contudo alguns ciclotemas subtidais e sedimentos episódicos descontínuos são também reconhecíveis. Incluem variados macro e microfósseis tais como:

equinóides, crinóides, coraliários, catetídeos, estromatoporídeos, briozoários, moluscos, braquiópodes, foraminíferos, algas calcárias, ostracodos, etc. Para o topo (Caloviano) estas fácies típicas da Formação Santo António - Candeeiros são intercaladas por calcários compactos com braquiópodes, amonóides, belemnóides e filamentos (Azerêdo, 2007).

Esta formação subdivide-se em três membros: Membro de Codaçal, Membro de Pé da Pedreira e Membro de Moleanos. O afloramento do Vale Florido em estudo insere-se no primeiro membro, no Membro do Codaçal (Fig 3.7).

Segundo Azerêdo (2007), o Membro de Codaçal, que data do Batoniano inferior, tem espessuras médias da ordem dos 50-60m, embora no lado Oeste as espessuras sejam em média mais elevadas, cerca de 70 a 80m. Este Membro é constituído por calcários bioclásticos e oobioclásticos, esporadicamente dolomitizados. Na sua maioria os depósitos deste membro, são maciços de espessuras elevadas ou mais raramente de espessura média, estando a estratificação mal definida; a coloração é em geral creme, creme-esbranquiçada ou branca podendo mais raramente ser amarelada formando frequentemente níveis bimodais, oosparites e oobiosparites de texturas *grainstone* a *rudstone*, ocorrendo também outros grãos carbonatados como sejam intraclastos, pelóides e oncoides. Alguns destes depósitos apresentam estruturas sedimentares de diversos tipos: estratificação oblíqua (tabular ou enconchada), *ripple marks* e estratificação paralela com granulotriagem. É também comum serem visíveis algumas paragens de sedimentação (*hardgrounds*).

Neste membro ocorrem também biostromas de coraliários e algas, de espessura variável mas que em geral é reduzida. Estes níveis intercalam e interdigitam com as restantes litofácies, sendo a textura dominante *bafflestone*, raramente *framestone* e por vezes *rudstone* ocorrendo diversos organismos associados: equinodermes, gastrópodes, serpulídeos e estromatoporídeos, entre outros. Estes calcários sobrepõem-se aos termos dolomíticos e micríticos do topo da Formação de Chão das Pias, enquanto que o seu limite superior é assinalado por uma passagem diacrónica à Formação de Serra de Aire, havendo interdigitação entre as duas unidades (Azerêdo, 2007).

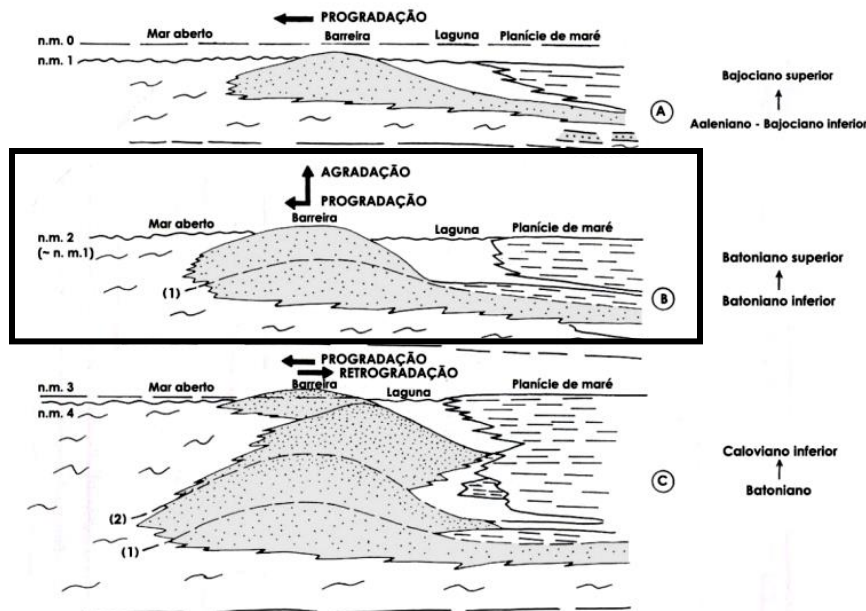


Fig.3.6 – Representação esquemática da evolução do complexo barreira, durante o Jurássico Médio. A) Começam a desenvolver-se pequenos baixios de sedimentação mais energética, no Bajociano sup., que pronunciam o início da progradação rápida para W, de fácies de rampa interna, com nível do mar em descida relativa; B) No **Batoniano inf.** continua a existir progradação de barreira, mas gradualmente a sedimentação passa a equilibrar a variação do nível do mar, e a componente de aggradação vertical vai dominar. C) Caloviano inf. há um episódio de rápida retrogradação com redução drástica das fácies ante-barreira e subida do nível do mar, seguida de nova fase progradante (Azerêdo, 1993). Foi assinalado a idade do afloramento em estudo

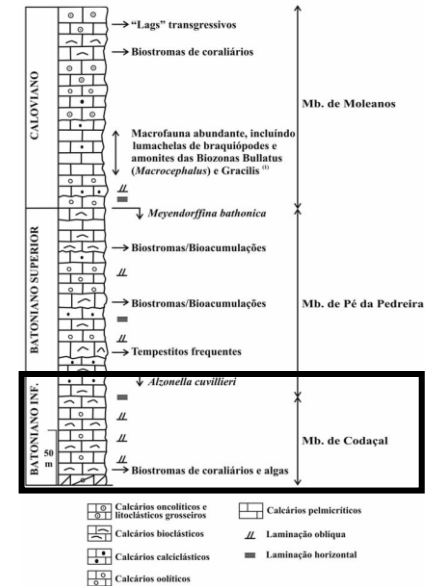


Fig. 3.7 – Coluna litostratigráfica sintética da Formação de Santo António-Candeieiros, assinalando os principais marcadores considerados (Azerêdo, 2007). Foi dado ênfase na imagem para o Mb. de Codaçal, do qual o afloramento em estudo faz parte.

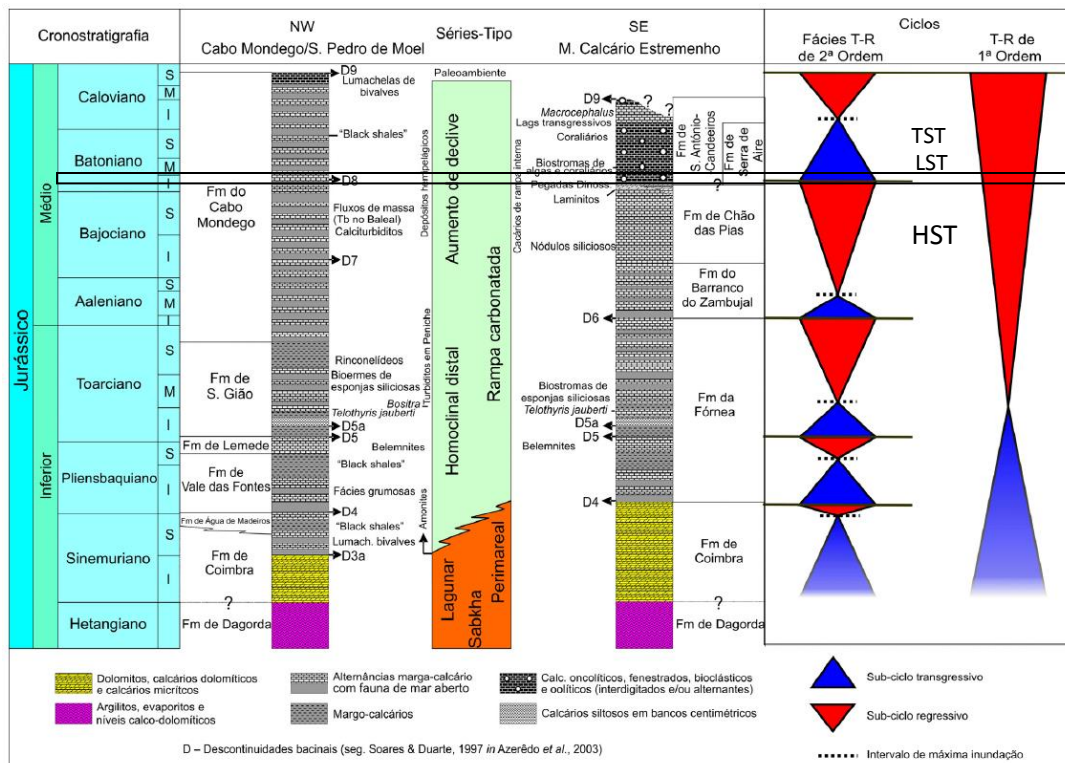


Fig. 3.8 – Síntese interpretativa integrada da organização sequencial do Jurássico Inferior e Médio da Bacia Lusitânica em termos de Ciclos (2ª ordem) maiores de Fácies Transgressivas-Regressivas, mostrando em paralelo a sucessão litostratigráfica e condições paleodeposicionais que os materializam (Azerêdo et al. 2014). Foi sinalizada na imagem a formação em estudo. TST= Transgressive System Track ; LST = Lowstand System Track; HST =Highstand System Track

Foram definidas por Azerêdo (1993, 1998) 11 litofácies para o MCE. Apenas três dessas litofácies se encontram na secção em estudo – Litofácies 1, 2 e 3 (Fig. 3.9 , Tab. 3.1).

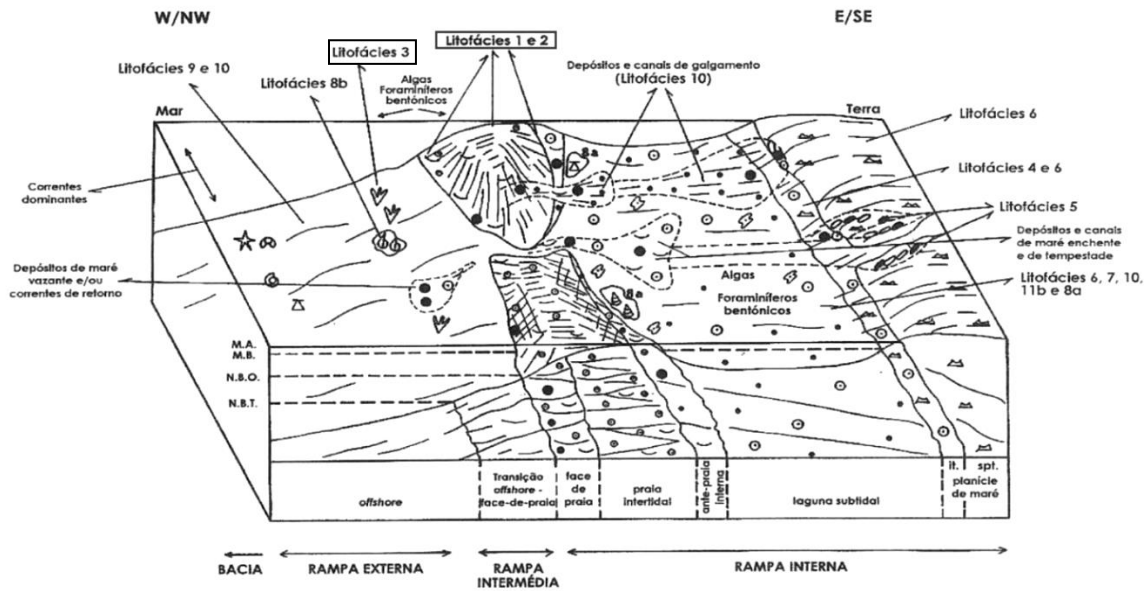


Fig. 3.9– Reconstituição dos paleoambientes sedimentares propostos para as diversas litofácies e as suas associações, no quadro de um sistema de rampa carbonatada. O declive está exagerado com o propósito de evidenciar os diferentes subambientes de rampa interna. (Azerêdo 1993). Foram assinaladas com um rectângulo as litofácies relevantes para o presente estudo.

Litofácies	Ambientes Sedimentares	Classificação
1 - Grainstones oolíticos e bio-intraclásticos com estratificação oblíqua.	Barreira (face de praia e praia s.s.); washovers; canais de maré (?).	Rampa Interna
2 - Rudstones, Grainstones e Packstones bioclásticos/oncolíticos/litolásticos.	Barreira (transição offshore/face de praia inf. até praia s.s.); washovers	Rampa Intermédia e Interna
3 - Biolititos de Coraliários e Algas.	Barreira (transição offshore/face de praia inferior); transição barreira interna - laguna?.	Rampa Intermédia e Interna
4 - Rudstones e Packstones oncolíticos com fenestrae e pseudofenestrae.	Laguna – planície de maré; canais de maré.	Rampa Interna
5 - Microconglomerados com clastos micríticos e clastos negros	Planície de maré (intertidal superior a supratidal).	Rampa Interna
6 - Mudstones e Wackestones com fenestrae e laminações.	Laguna – planície de maré.	Rampa Interna
7 - Floatstones, Wackestones e Mudstones com nódulos algais/oncóides e ferruginização.	Laguna e canais de maré (?)	Rampa Interna
8 - Coraliários lumachélicos: 8a - “Lumachelas” de Gastrópodes/ Lamelibrânquios; 8b - “Lumachelas” de Braquiópodes	8a - Laguna; 8b - Barreira (transição offshore/face-de-praia inferior).	Rampa Interna Rampa Intermédia a Interna
9 - Mudstones, Wackestones e Packstones bioclásticos: 9a - Calcários compactos; 9b - Calcários, calcários margo-argilosos e margas.	Marinho externo; transição offshore-barreira	Bacia/Rampa Externa a Intermédia
10 - Packstones indeferenciados	Transição offshore-barreira; laguna; washovers	Rampa Externa a Intermédia
11 - Dolomitos / Calcários dolomíticos: 11a - Doloparites; 11b - Dolomicrites e dolomicrites laminares.	11a - Baixios (?), Barreira (?); 11b - Laguna e planície de maré (intertidal superior a supratidal)	Rampa Intermédia a Interna Rampa Interna

Tab. 3.1- Litofácies reconhecidas no Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho, com respectiva interpretação paleoambiental (Azerêdo 1993, 1998; *in* Pimentel, 2005 e Inês, 2010). Foi dado ênfase às três litofácies encontradas no afloramento em estudo.

Litofácies 1 (L1) – Grainstones oolíticos e bio-intraclásticos

Os componentes observados nesta litofácies são na sua maioria oóides, bioclastos e intraclastos, que coexistem quase sempre em toda a extensão variando apenas as suas proporções relativas.

Segundo Azerêdo (1993), definem-se com mais clareza dois tipos de grainstones, que comumente se associam de forma cíclica: um correspondente a calcários oolíticos quase “puros”, bem calibrados, com percentagens de outros grãos inferiores a 10%; e outro maioritariamente constituído por bioclastos (cerca de 50%) e por intraclastos, sendo os oóides elemento acessório. Outros elementos aloquímicos, como sejam pelóides, oncoides, litoclastos e agregados, ocorrem também com frequência nesta litofácies. Os bioelementos presentes são essencialmente: fragmentos de equinodermes e moluscos (lamelibrânquios e gastrópodes), algas calcárias e organismos micromorfológicamente semelhantes (mas de posição sistemática incerta) e foraminíferos bentónicos. Por vezes, também é possível observar estruturas de bioturbação e bioerosão, assim como *hardgrounds* (Azerêdo, 1993).

Para este trabalho, subdividiu-se a Litofácies 1 em 1a e 1b. Esta subdivisão foi feita pela observação ou não de estruturas sedimentares à macroscale, verificando-se que nos calcários designados como litofácies 1b existe uma maior quantidade de poros – maior porosidade (D3, Topo E1, e F2,75). As estruturas sedimentares presentes podem causar anisotropias em termos de permeabilidade e aumento de porosidade (ex.: porosidade de canal e fractura). L1b implica uma deposição dominada por processos de ondulação, correspondendo a um ambiente sedimentar de *shoreface* superior. L1a sugere um fluxo maioritariamente unidireccional, aproximando-se mais de ambiente sedimentar de *shoreface* inferior.

Litofácies 1a (L1a) - Grainstones com estratificação paralela horizontal determinada por granulotriagem, ou sem qualquer tipo de estratificação.

Litofácies 1b (L1b) - Grainstones com estruturas sedimentares muito bem marcadas: estratificação oblíqua, estratificação oblíqua enconchada, *ripple marks*, etc.

Litofácies 2 (L2) – Rudstones e Grainstones Bioclásticos/Oncolíticos/ Litoclásticos

Litofácies constituída por calcários clásticos grosseiros a muito grosseiros, esbranquiçados, com bioclastos, oncóides e litoclastos (maioritariamente intraclastos) abundantes. Os clastos encontram-se rodeados por uma matriz oolopelagítica. O grau de exposição de calcários desta

litofácies é muito menor, quer em afloramentos naturais quer em pedreiras. Em geral apresentam-se em bancadas de aspecto maciço ou apenas estruturadas em laminação paralela horizontal, definida por granulotriagem. Raramente, é possível observar estratificação oblíqua planar de pequeno ângulo de “grande” escala.

Os elementos Figurados carbonatados de origem orgânica correspondem a: equinóides e crinóides; gastrópodes; lamelibrânquios; calcisponjas Chatetidae; algas diversas; foraminíferos bentónicos; braquiópodes; ostracodos e briozoários (Azerêdo 1993).

Esta litofácies pode-se associar às outras litofácies sendo no entanto distinguível macroscopicamente. A ausência de estratificação ou gradação planar, indica um fluxo unidireccional tal como L1a, e a granularidade grosseira indica fluxos tempestíticos, num ambiente sedimentar de *shoreface* inferior. O sedimento intersticial peloidico-intraclástico é interpretado como *washovers* de nuvens tempestíticas (Azerêdo, 2013).

Litofácies 3 (L3) – Biolititos de Coraliários e Algas

Ocorrências bioedificadas observadas *in situ* constituem unidades esparsas na região em estudo. Contudo, tendo em conta a suposta fragilidade das estruturas *bafflestone*, raramente *framestone* e a comum inclusão conjunta de fragmentos de coraliários e de algas na biofase dos vários tipos de calcários clásticos (Litofácies 1 e 2 já descritas), poder-se-á conjecturar que estas bioconstruções seriam na realidade, algo mais numerosas, tendo sido destruídas.

Estes corpos bioconstruídos terão sido sempre de dimensões reduzidas, correspondendo a *micro-biostromas*. As estruturas de coraliários que se observam no afloramento definem horizontes/níveis de espessura variável, que se observam de forma descontínua, segundo extensões que variam entre cerca de uma dezena a duas centenas de metros. Além dos coraliários e algas estão presentes outros organismos: gastrópodes, lamelibrânquios, braquiópodes, serpulídeos, espongiários e estromatoporídeos (Azerêdo 1993), encontrando-se estes organismos muitas vezes rodeados por uma matriz oolítica. Devido à matriz ser muitas vezes oolítica e/ou clástica nos níveis em estudo, esta litofácies possui por vezes texturas *grainstone* ou *rudstone*.

4. Metodologia de estudo

4.1. Métodos e técnicas laboratoriais

4.1.1. Selecção de amostras

Na selecção de amostras para estudo estratigráfico teve-se em conta dois critérios/aspectos:

- Representatividade do caso em estudo;
- Não haver indícios de meteorização e/ou alteração.

Após seleccionadas as amostras, estas foram identificadas com uma referência e a sua respectiva orientação.

4.1.2. Tratamento laboratorial das amostras seleccionadas

Antes de aplicação das técnicas/métodos laboratoriais, teve-se em atenção:

- Se existiam impurezas nas amostras;
- Qual a secção da amostra seria mais útil estudar;
- Armazenamento das amostras de forma a evitar contaminações.

4.1.3. Método do Azul Ceres

Com este método pretende-se impregnar as taliscas de cada amostra seleccionada com “Azul Ceres”, e posterior realização de lâminas. A coloração com azul Ceres permite identificar a porosidade e caracterizá-la, podendo-se, assim, estimar a porosidade relativa nas lâminas obtidas. A realização deste método baseou-se no procedimento descrito em Inês (2010) que, por sua vez, se baseou em dois protocolos: um deles proveniente da Universidade Federal do Rio Grande do Sul do Brasil e o outro proveniente de Tucker (1988): “*impregnation technique for the production of epoxy resin pore casts*” (técnica de impregnação para a produção de moldes de poros em resina).

Este método, no entanto, tem de ser adaptado a cada litotipo, tendo por isso sido um pouco alterado no que toca às dosagens dos elementos necessários. Para este trabalho a dosagem utilizada foi por cada 10 amostras, 3,2g de azul Ceres + 98 ml de resina + 14 ml de endurecedor + 48 ml de álcool etílico.

De uma forma simplificada este método é realizado seguindo 5 passos (Fig.4.1):

- 1) Cortar taliscas com utilização da Serra de Corte;

- 2) Colocar as amostras num recipiente e adicionar a solução de azul Ceres utilizando a dosagem já mencionada. Inserir os recipientes na bomba de vácuo;
- 3) Retirar as taliscas de dentro da massa de azul Ceres solidificado e polir suavemente;
- 4) Preparar uma mistura de 1,5 ml de resina + 0,5 ml de endurecedor (para 10 taliscas) e colar a face de observação da talisca na lâmina de vidro. Deixar ficar o conjunto na prensa (3-6 horas);
- 5) Cortar as taliscas e verificar se têm a espessura correcta de uma lâmina delgada (30 μm) e colar uma lamela com bálsamo do Canadá.

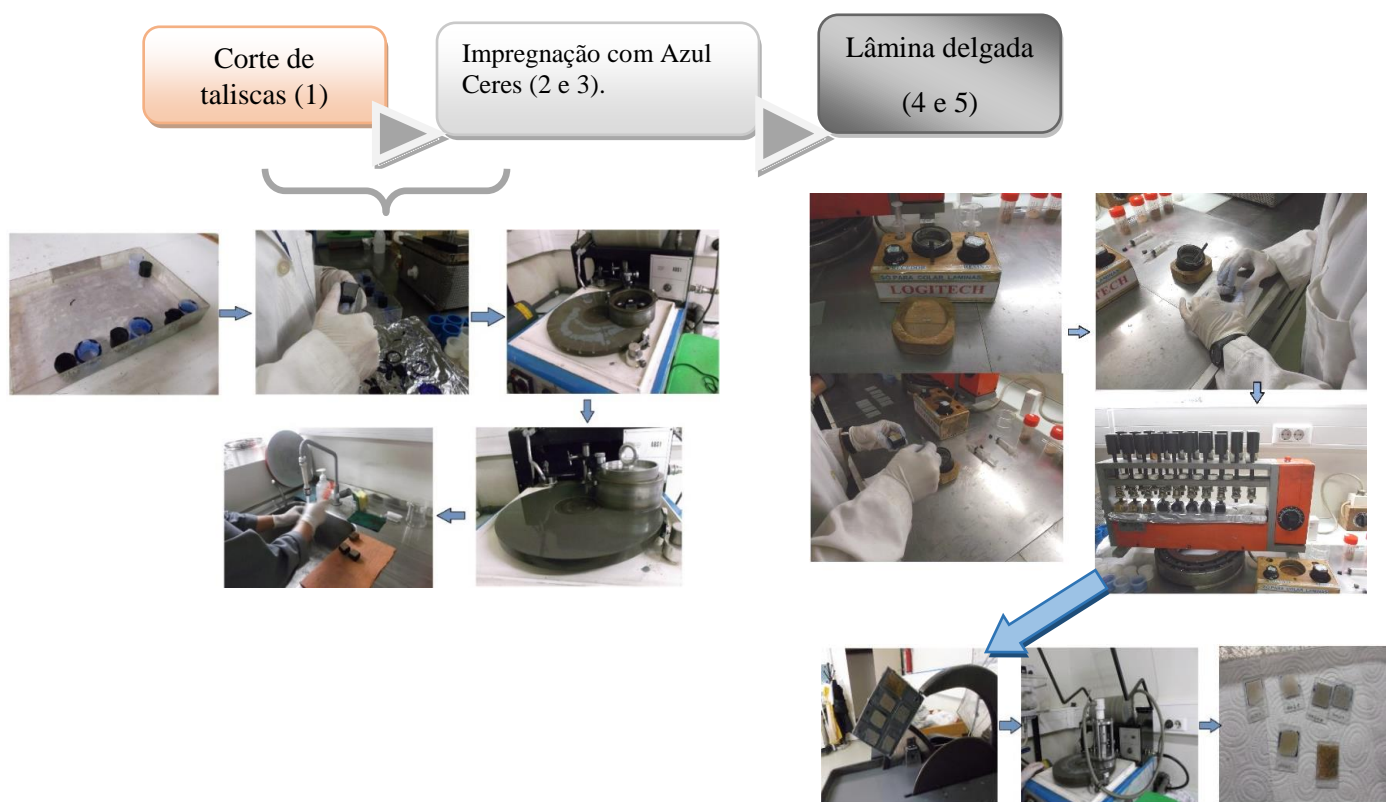


Fig. 4.1 – Esquema simplificado das etapas para a obtenção de lâminas impregnadas com Azul Ceres

4.1.4. Método da determinação da porosidade relativa das rochas por saturação em água

A aplicação desta técnica tem como objectivo obter um valor de porosidade relativa para cada amostra por saturação dessas amostras em água. O procedimento seguido baseou-se nas indicações do Professor Fernando Marques e Professora Isabel Fernandes as quais foram também em parte baseadas em Franklin (1979) “*Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties*”.

Para a determinação das porosidades, é conveniente seguir várias etapas:

- 1) Anota-se o valor dos pesos seco (W_s), saturado (W_{sat}) e submerso (W_{sub}) de cada amostra;
- 2) Calcula-se o volume efectivo de poros através da expressão: $V_{pe} = \frac{W_{sat} - W_s}{\rho_w}$, sendo ρ_w correspondente à densidade da água ($\sim 1 \text{ g.cm}^{-3}$);
- 3) Calcula-se o $W_{desl.}$, isto é o peso do deslocamento, que é a diferença entre o peso saturado e o peso submerso ($W_{sat} - W_{sub}$);
- 4) Calcula-se o Volume efectivo pela equação: $V_{ef} = \frac{W_{desl.}}{\rho_w}$;
- 5) Finalmente calcula-se a porosidade efectiva através da equação: $\emptyset(\%) = \frac{V_{pe}}{V_{ef}} * 100$.

Para a obtenção dos pesos foi utilizada uma balança analítica de precisão com quatro casas decimais, estando as amostras sempre suspensas por um fio de nylon ou por uma rede previamente pesados. No caso do peso saturado e submerso as amostras têm de estar completamente saturadas em água, para isso, são previamente colocadas numa bomba de vácuo até deixarem de libertar bolhas de ar (Fig.4.2). Os detalhes deste procedimento foram descritos por Inês (2010).



Fig. 4.2 – Bomba de vácuo utilizada para saturar as amostras em água

4.1.5. Carotagem

A carotagem consiste na obtenção de carotes/plugs (Fig. 4.3) utilizando uma máquina carotadora e foi realizada com o objectivo de se obterem valores de permeabilidade e valores de porosidade através do porosímetro por expansão de gás Hélio (ver ponto 4.1.6), necessitando as amostras de ter 1.5 polegadas (3.8 cm) de diâmetro e 2.5 ou 3 polegadas (6,4 a 7,6 cm) de comprimento.

Este método foi realizado com a ajuda do Professor Fernando Marques. Para serem carotadas, as amostras tiveram de ser colocadas numa caixa com areia para que ficassem imobilizadas enquanto a perfuração era feita. Algumas das amostras tiveram ainda de ser montadas em argamassa devido à sua pequena dimensão, que impossibilitava estas ficarem presas apenas com a areia; assim adicionou-se cimento, areia e água até se criar uma “massa” com consistência, que foi depois colocada em sacos de plástico com a amostra no centro, tendo-se o cuidado de pôr a argamassa de forma a que, quando esta secasse tivesse uma forma aproximadamente de paralelepípedo, sendo assim mais fácil prender a amostra e depois perfurá-la.



Fig. 4.3 – Plugs obtidos por carotagem de algumas amostras

4.1.6. Determinação da porosidade através do porosímetro por expansão de gás Hélio (He) e determinação da permeabilidade através do permeâmetro digital de gás.

Estes dois métodos foram realizados pelo Dr. Jorge Salgado Gomes no *Petroleum Institute* (PI) em Abu Dhabi, tendo sido cedido o procedimento (em anexo) e informações sobre estes métodos.

I) Método do Porosímetro por expansão de gás Hélio (He) – Ergo Tech e Vinci

Este método é baseado na Lei de Boyle da expansão do gás, $P_1V_1 = P_2V_2$, onde PV é constante, e é utilizado para medição directa do volume dos grãos e volume dos poros, numa célula auxiliar isotérmica. Subsequentemente, a porosidade e densidade do grão pode ser calculada a partir das medições directas. O volume bulk é determinado por medições do diâmetro e comprimento do plug através do caliper (digital vernier caliper), sendo expresso pela equação: $V_{bulk} = \pi r^2 L$. O volume dos grãos (V_g) é dado pela equação: $V_g = [P_2c (V_r + V_{cup} - V_{std}) - (P_1c V_r)] / P_2c$; onde: **V_r** = volume de referência (cc); **V_{cup}** = volume do copo matriz (cc); **V_{std}** = volume de grãos de discos calibrados (cc); **P_{1c}** = pressão inicial corrigida (psi) = $P_1 (T_c/T_1)$ e **P_{2c}** = pressão final corrigida (psi) = $P_2 (T_c/T_2)$. T₁ é a temperatura inicial, e T₂ é a temperatura final em °C; T_c é a temperatura de calibração em °C. O volume de poros (V_p) é determinado através do volume de grãos (V_g) menos o volume bulk (V_{bulk}), sendo a porosidade dada pela equação: $\phi = (V_p/V_g) * 100\%$.

As medidas são efectuadas em plugs cilíndricos, com 1,5 a 2 cm de diâmetro. O hélio pode ser modelado como um gás ideal para a maioria das pressões e temperaturas de interesse. Este gás consiste em pequenas moléculas que penetram em pequenos poros da rocha. Por ter uma massa pequena e uma alta difusividade, este gás pode ser utilizado para determinar porosidades em rochas com baixa permeabilidade, como é o caso da maioria dos plugs estudados.

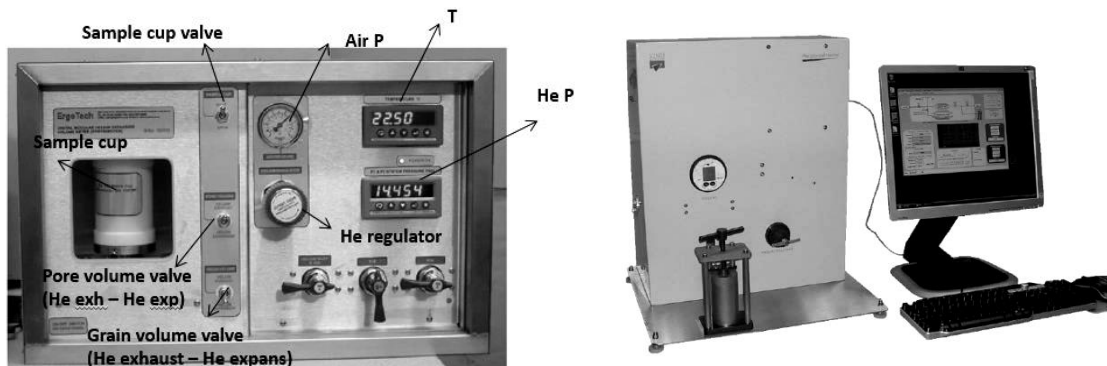


Fig. 4.4 – Porosímetros por expansão de gás He (Ergo Tech e Vinci).

II) Método do permeâmetro digital de gás – *Digital gas permeameter DGP-200 e Vinci Gasperm*

Para este método utilizam-se, uma vez mais, os plugs cilíndricos de dimensões conhecidas, e as medições de permeabilidade (k) são realizadas em estado estacionário - *steady state* ($V_2=V_1$).

A equação para a determinação da permeabilidade é modificada da Lei de Darcy conforme indicado a seguir:

$$k = \mu \times Q_m \times P_a \times L / A \times \Delta P \times P_m$$

Onde μ é viscosidade do Azoto = $(0,00005 \times T_g) + 0,0164$ Pa (pressão ambiente) em atm, que pode ser medida à pressão atmosférica num barómetro de mercúrio, pt (em mm Hg) de acordo com a equação: P_a (atm) = P_t (mm Hg) / 760

L = comprimento em cm; $A = \Pi D^2/4$; ΔP = (pressão diferencial), diferença entre P_1 (pressão *upstream*) e P_2 (pressão *downstream*) ao longo do plug, o valor máximo de ΔP é 400 psi; P_m é a pressão média do plug em atm. $P_m = (P_1 + P_2) / 2$ atm. Q_m é o fluxo/caudal médio do gás na amostra (ml/s). Como ilustrado na figura 4.5.

Em caso do fluxo ser para a frente (*Forward Flow*): $P_1 = \Delta P$ (psi) / 14,7 + P_a (atm) e $P_2 = P_a$ (atm).

Em caso de fluxo para trás (*Back Flow*): $P_1 = (P_i$ (psi)/14,7) + P_a (atm) e $P_2 = (P_i - \Delta P)/14,7 + P_a$.

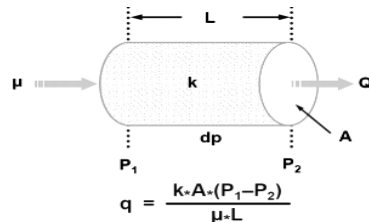


Fig. 4.5– medida da permeabilidade absoluta do gás utilizando a Lei de Darcy

Este método só pode ser utilizado em casos de fluxo laminar. Foi aplicada a correcção de Klinkenberg nas medições. Durante a correcção de Klinkenberg, a permeabilidade do gás é corrigida para o efeito do fenómeno de *gas slippage* (deslizamento de gás), uma vez que o gás, em contraste com o fluido, tem a capacidade de deslizar para paredes de poros e consequentemente aumentar o valor da permeabilidade. Assim o valor com a correcção de Klinkenberg é significativamente mais reduzido que sem esta correcção. O efeito de Klinkenberg é uma função do raio e tortuosidade dos poros nas medições das amostras. A utilização de gás

tem como vantagem este não ser reactivo com os grãos, não alterando a geometria dos poros (Mansurbeg, 2001).

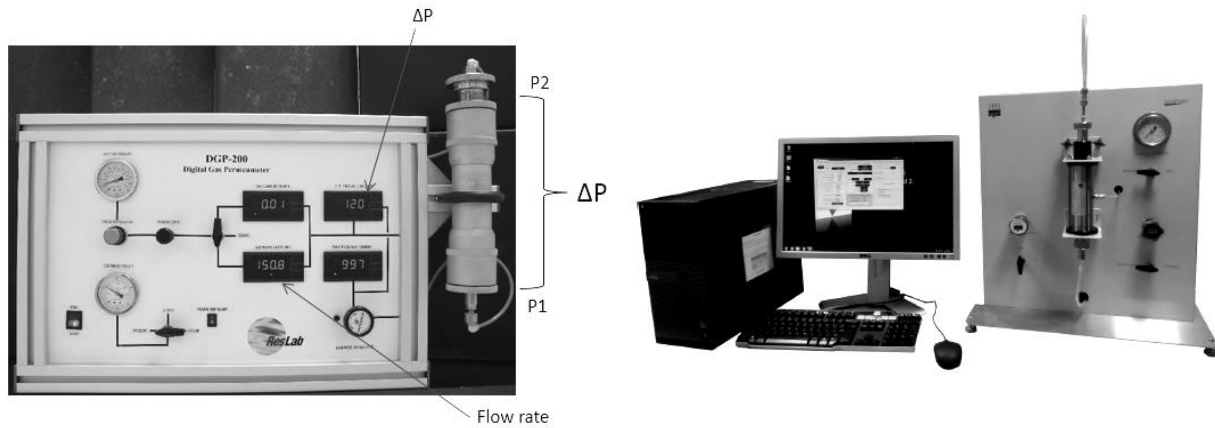


Fig. 4.6— Permeâmetro digital de gás (DGP-200 e Vinci *GasPerm*)

4.2. Nomenclatura, classificações e conceitos associados à porosidade e permeabilidade

4.2.1. Classificação Composicional e Textural

Foram adoptadas para este trabalho a classificação composicional segundo Folk (1959,1962) e a classificação textural segundo Dunham (1962).

A classificação composicional (Fig.4.7) distingue os componentes, enquanto que a classificação textural (Fig.4.8) divide os calcários em: grainstone (suportada pelos grãos, sem vasa), packstone (suportada pelos grãos, com vasa), wackestone (suportada pela vasa, grãos entre 10-60%) e mudstone (micrite com <10% de grãos). Termos adicionais de Embry e Klovan (1971) dão indicações de tamanho de grão grosseiro (floatstone e rudstone), e do tipo de ligação orgânica e morfologia das rochas boundstone (bafflestone, bindstone e framestone).

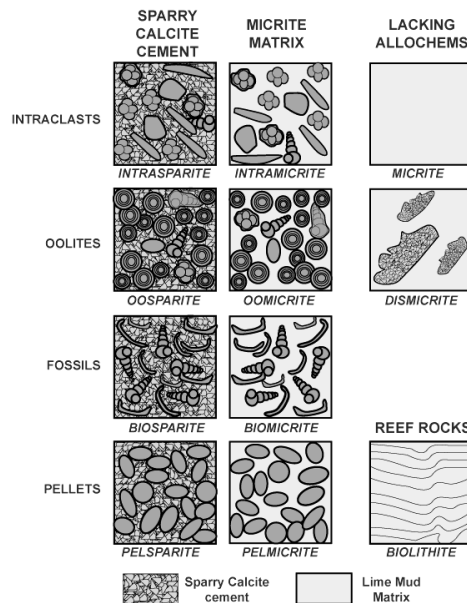
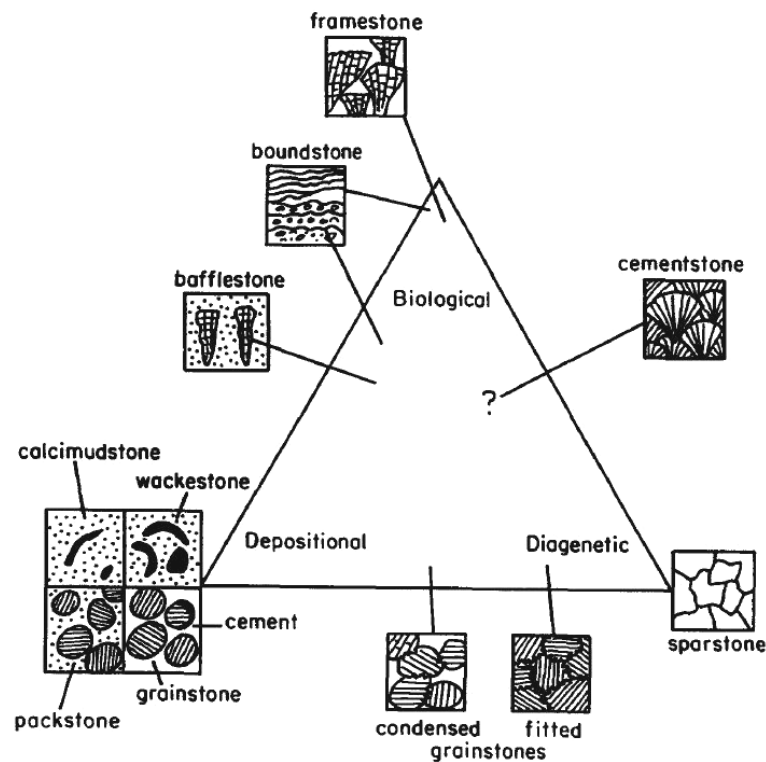


Fig. 4.7 – Classificação composicional de Folk (1959, 1962) in Kendall (2005).

Original components not bound together during deposition				Original components bound together	Depositional texture not recognizable	Crystalline carbonate	Original components not organically bound during deposition		Original components organically bound during deposition		
Contains lime mud			Lacks mud and is grain supported				>10% grains >2mm		Organisms act as baffles	Organisms encrust and bind	Organisms build a rigid framework
Mud-supported		Grain-supported					Matrix supported	Supported by > 2mm components			
Less than 10% grains	More than 10% grains										
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline	Floatstone	Rudstone	Baffle stone	Bindstone	Framestone	

Fig. 4.8 – Classificação textural de Dunham (1962) com termos adicionais de Embry & Klovan (1971) in Tucker (1981)

A classificação de Wright (1992) separa as classificações já definidas por Dunham e Embry & Klovan em três classes (Fig.4.9): deposicional, biológica ou diagenética. Foram ainda adicionados novos termos no que toca aos termos diagenéticos (*condensed* e *fitted grainstone*, *sparstone*, *microsparstone* e *cementsone*). Esta classificação poderá ser uma ajuda na identificação do tipo de reservatório.



DEPOSITIONAL				BIOLOGICAL			DIAGENETIC			
Mixed supported (clay and silt grains)		Grain-supported		In situ organisms			Non-obliterative			Obliterative
< 10% grains	> 10% grains	with matrix	no matrix	rigid organisms dominant	encrusting binding organisms	organisms acted to baffle	main component in cement	many grain contacts micro-stylolites	most grain ascontacts are micro-stylolites	crystals > 10 µm
CALCI-MUDSTONE	WACKESTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	FRAMESTONE	BOUNDSTONE	BAFFLESTONE	CEMENTSTONE	CONDENSED GRAINSTONE	FITTED GRAINSTONE	SPARSTONE
	FLOATSTONE	RUDSTONE								Crystals < 10 µm MICRO-SPARSTONE
	Grains > 2 mm									

Fig. 4.9 – Classificação segundo Wright (1992).

4.2.2. Definição de porosidade e permeabilidade

a)

A porosidade (Φ) é um parâmetro que indica a quantidade de espaços vazios existentes nos interstícios de uma rocha, para um determinado volume da mesma, podendo estes poros estar ou não interconectados entre si, definindo a capacidade de armazenamento de fluidos da rocha em estudo (Corrêa, 2003; Asquith & Krygowski, 2004; Ahr, 2008).

A porosidade obtém-se dividindo o volume da porção de rocha não sólida (poros ocupados por fluidos e/ou ar) pelo volume total da rocha.

Assim, a porosidade de uma rocha é definida por:

$$\Phi (\%) = (V_p/V_t) \times 100 \%,$$

V_t = volume total da rocha;
 V_p = volume poroso.

Os valores típicos de porosidade estão compreendidos entre os 5% e 30%. Para uma rocha ser considerada um bom reservatório, no entanto, esta deve apresentar uma porosidade de cerca de 15% a 30% (Gomes & Alves, 2007).

O volume total ocupado por uma rocha reservatório é a soma do volume dos materiais sólidos (grãos, matriz, cimento) e do volume dos espaços vazios existentes entre eles. O volume de espaços vazios é normalmente denominado de volume poroso (Thomas, 2001).

O volume total da rocha é dado pela equação:

$$V_t = V_p + V_s$$

V_s = volume de sólidos.

Porosidade absoluta: razão entre o volume de todos os poros existentes nos interstícios da rocha (estando estes interconectados ou não entre si) e o volume da rocha.

Porosidade efectiva: razão entre o volume dos poros interconectados e o volume da rocha. A porosidade efectiva indica o volume de poros conectados que existem no interior da rocha, que permite o fluxo de fluidos. Esta porosidade indica também o volume de fluidos que pode ser extraído da rocha (Asquith & Krygowski, 2004). Porosidade devida à existência de interconectividade entre os poros da rocha, existência de fracturas e/ou devido a coexistência de ambas as situações.

Porosidade residual: corresponde a todos os poros não interconectados entre si e/ou isolados na rocha.

Habitualmente a porosidade é superior, quando estamos na presença de rochas constituídas por partículas/grãos bem calibrados, do que na presença de rochas constituídas por grãos mal calibrados (Gomes & Alves, 2007).

b)

A Permeabilidade (k) consiste na capacidade ou medida da capacidade de uma rocha em transmitir fluidos, tipicamente medida em darcys ou milidarcys. O termo foi definido por Henry Darcy que demonstrou que a matemática utilizada para a transferência de calor podia ser modificada de forma a descrever adequadamente o fluxo dos fluidos (*fluid flow*) em meios porosos.

Permeabilidade absoluta: medida de permeabilidade conduzida quando um único fluido, ou fase, está presente na rocha.

Permeabilidade efectiva: capacidade de preferência de transmissão ou *flow* dentro de uma rocha quando outros fluidos imiscíveis estão presentes no reservatório (por exemplo a permeabilidade efectiva do gás num reservatório gás-água).

A saturação relativa dos fluidos bem como a natureza do reservatório afectam a permeabilidade efectiva.

Permeabilidade relativa: razão entre a permeabilidade efectiva de um fluido particular com uma saturação particular e a permeabilidade absoluta desse fluido em saturação total. Se apenas um fluido está presente na rocha a sua permeabilidade relativa é 1.0. O cálculo da permeabilidade relativa permite a comparação das diferentes capacidades dos fluidos para fluírem na presença uns dos outros, uma vez que a presença de mais de um fluido geralmente inibe o fluxo.

4.2.3. Classificação do tipo de porosidade

O tipo de poros é mais variado e complexo nos carbonatos e por isso a distribuição espacial da porosidade é muito mais heterogênea e menos previsível.

Neste trabalho recorreu-se à classificação modificada da porosidade em rochas carbonatadas de Choquette & Pray (1970) para classificar os diferentes tipos de porosidade presentes (Fig 4.10).

Aplicou-se também a classificação qualitativa da porosidade (Fig. 4.11), segundo Inês *et al.* (2012), tendo esta classificação da porosidade sido baseada nas classificações de Archie (1952), Azerêdo (2010), entre outros.

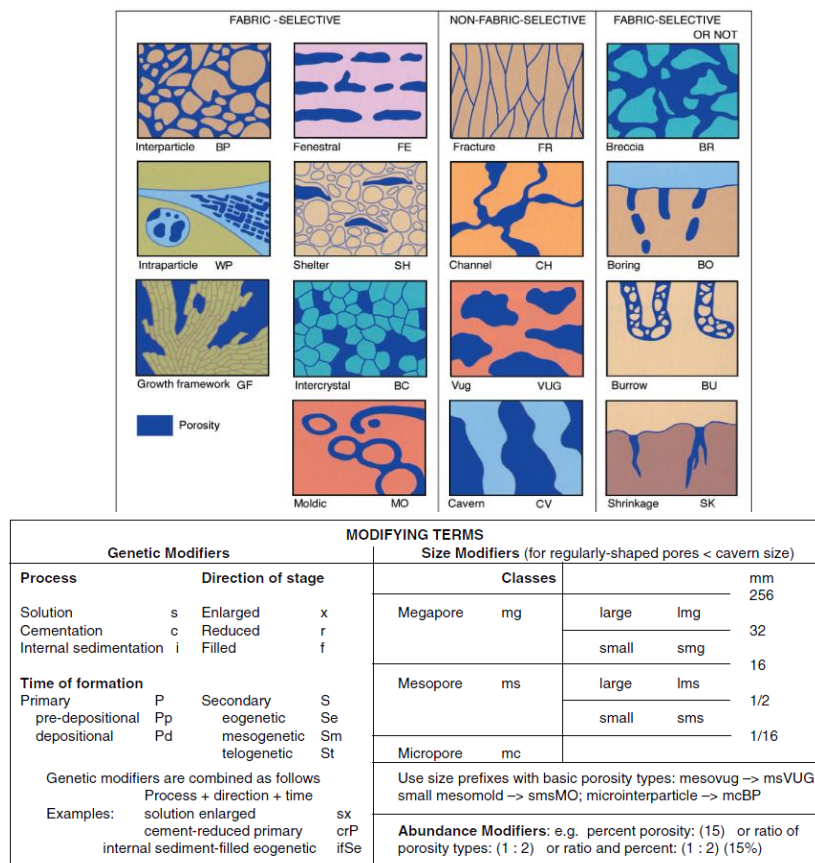


Fig. 4.10 – Classificação da Porosidade segundo Choquette & Pray (1970) in Flügel (2010)

Porosity	%	Color	Details observation
Null	0 - 2		
Low	> 2 - < 5		
Moderate	≥ 5 - < 10		
Good	≥ 10 - < 15		
Very Good	≥ 15 - 20		
Excellent	≥ 20		
Legend			
Level of porosity			
Occasional porosity			

Fig. 4.11 – Classificação qualitativa da porosidade. Retirado de Inês *et al.* 2012.

4.2.4. Classificação da permeabilidade

Petrograficamente apenas se consegue fazer uma estimativa qualitativa da permeabilidade. Neste trabalho foi utilizada a classificação segundo Gomes & Alves (2007) onde a permeabilidade é classificada como: nula (aparenta não ter conectividade; poros isolados), baixa, moderada e alta (Fig. 4.12).

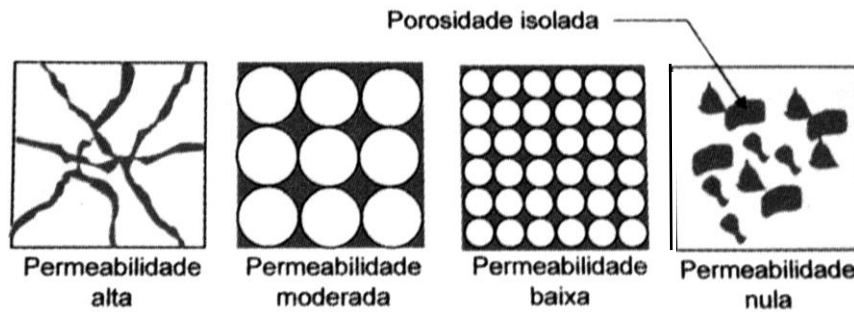


Fig. 4.12 – Classificação qualitativa da permeabilidade segundo Gomes & Alves (2007)

É também possível relacionar a permeabilidade com diferentes texturas e porosidade. A imagem abaixo mostra diferentes rochas carbonatadas segundo a classificação de Dunham e intervalos de porosidade/permeabilidades possíveis (Fig. 4.13).

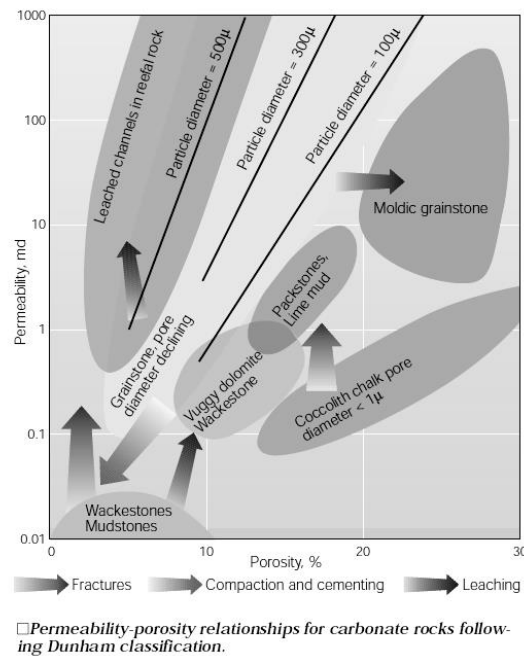


Fig. 4.13 – Relações porosidade/permeabilidade para rochas carbonatadas seguindo a classificação de Dunham (Akbar *et al.* 1995).

4.2.5. Relação entre geometria, tamanho e raio dos poros e permeabilidade. Relações ϕ -k: Reservoir Rock Typing

As propriedades dos reservatórios são controladas pela geometria dos poros, em particular a dimensão da garganta dos poros (*pore throat*) e a conexão entre poros, que por sua vez é função do tamanho e da forma dos grãos e cristais (Fig.4.14).

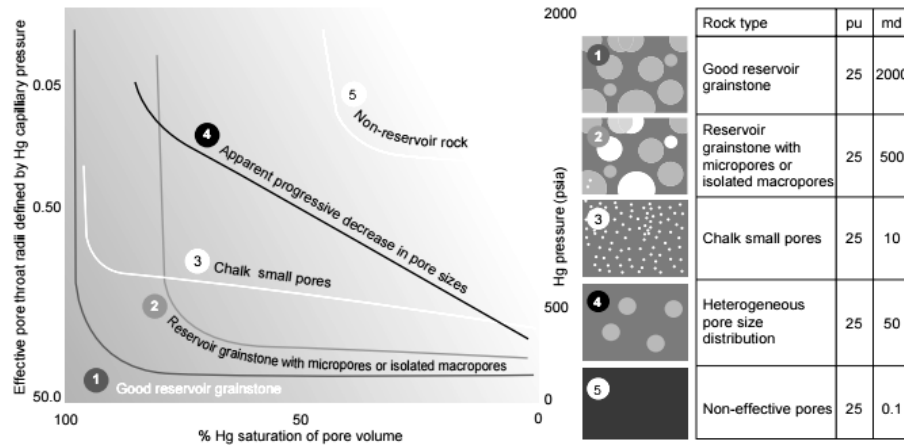


Fig. 4.14 – Relação entre a garganta e tamanho (volume) de poros para diversos rock types e permeabilidade. Retirado de Nurmi & Standen (1997)

Existem vários métodos e equações que determinam a permeabilidade através de parâmetro associado às dimensões da garganta dos poros, área dos poros, pressão capilar, entre outros (Schwartz & Banavar, 1989; Winland in Pittman, 1992; Rezaee & Lemon, 1996). Na indústria um dos mais utilizados é o método de Winland, dado pela equação: $\text{Log } R35 = 0,732 + 0,588 (\text{Log } K) - 0,864 (\text{Log } \phi)$

Onde R35 corresponde ao raio da garganta do poro calculada a 35% de saturação em mercúrio das medições MICP – *Mercury Injection Capillary Pressure* (Gomes *et al.*, 2008).

Através da relação da porosidade (ϕ) e permeabilidade (k) podem-se separar as rochas por diversos RRT (*Reservoir Rock Type*). *Rock types* são unidades de rocha depositadas sob condições geológicas semelhantes que sofreram processos diagenéticos semelhantes, resultando numa rede de poros e molhabilidade (*wettability*) que é traduzida numa relação ϕ -k única, perfil de pressão capilar e um *data set* (conjunto de dados) de permeabilidade relativa para uma determinada altura acima do nível de águas livres (*FWL-free water level*) (Gomes *et al.*, 2008).

Na Figura 4.15 pode-se observar um exemplo de diversos *Rock Types* de um reservatório carbonatado do Cazaquistão.

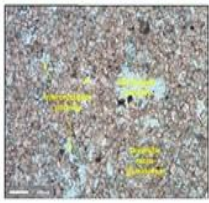
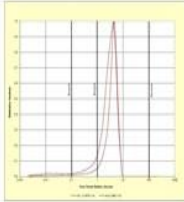

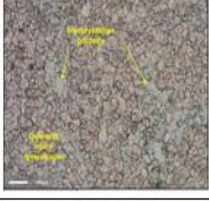
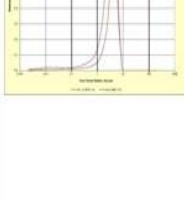
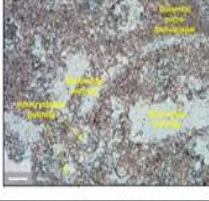
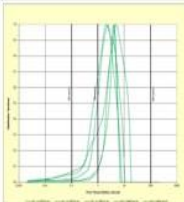

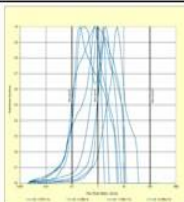
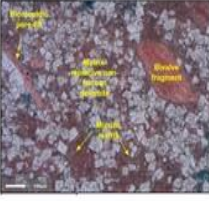
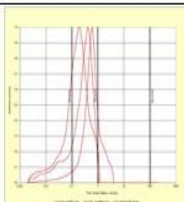
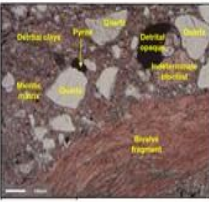
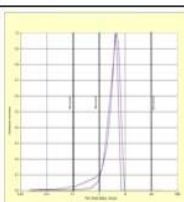
RRT	Colour Code	Φ (%)		k (mD)		Thin Sections/Texture	Pore System		Permeability Equation (from Winland R35)
		Min	Max	Min	Max		MICP	Connectivity	
RRT1a		15	36	> 240					$k=3.3069\Phi^{1.4694}$
RRT1b		14	32	90	240			Channel Thickness: 20 - 62.5 μm Connectivity: Moderate to high Continuity: Moderate to high	$k=1.2284\Phi^{1.4694}$
RRT2		11	30	25	90			Channel Thickness: 5 - 62.5 μm Connectivity: Low to moderate Continuity: Moderate	$k=0.488\Phi^{1.4694}$
RRT3		10	28	8	25			Channel Thickness: 1 - 20 μm Connectivity: Low to moderate Continuity: Low - moderate	$k=0.1867\Phi^{1.4694}$
RRT4		8	27	1	8			Channel Thickness: 1 - 20 μm Connectivity: Low Continuity: Low	$k=0.0639\Phi^{1.4694}$
RRT5		0.8	26	<0.09				Channel Thickness: None Connectivity: None Continuity: None	$k=0.0047\Phi^{1.4694}$

Fig. 4.15 – Reservoir Rock Type - RRT, relação entre litofácies, tamanho, conectividade e continuidade dos poros e permeabilidade. Exemplo num caso de reservatórios carbonatados (calcário e dolomitos). Retirado de Sousa *et al.* (2014).

4.2.6. Tipo de reservatórios carbonatados

Foi utilizada neste trabalho a classificação de tipo de reservatórios carbonatados de Ahr (2008). Segundo este autor os reservatórios dividem-se em três grandes categorias: reservatórios deposicionais, reservatórios diagenéticos e reservatórios fracturados, podendo existir reservatórios híbridos entre um tipo e outro (Fig. 4.16). Através deste diagrama é possível também retirar informação sobre a génese da porosidade em rochas carbonatadas.



Fig. 4.16 – Classificação do tipo de reservatório segundo Ahr (2008)

5. Análise multiscala das unidades do Vale Florido, MCE

Neste capítulo é apresentada a análise multiscala das unidades seleccionadas (litofácies, petrografia, diagénese, estratonomia e geometria dos corpos sedimentares, e heterogeneidades macro/mesoscala) combinando observações de campo e análise de lâminas delgadas.

5.1. Observações de campo na zona do Vale Florido

Neste local foram observadas litofácies típicas de alta energia e taxas de sedimentação elevada. Os níveis de mantos arenosos oolíticos (*Oolitic Sandsheets*) (Fig. 5.1) apresentam abundante material esquelético, incluindo corais (Fig. 5.2) e biostromas de corais, algas vermelhas e equinodermes (equinóides e crinóides); localmente, este material é intercalado por calcários packstones ricos em pelóides e intraclastos. Estas unidades são interpretadas como sendo de ambiente de barreira, formando-se os biostromas na zona mais exterior dessa barreira (Azerêdo, 1998, 2013).



Fig. 5.1 – *Oolitic Sandsheets* na zona do Vale Florido

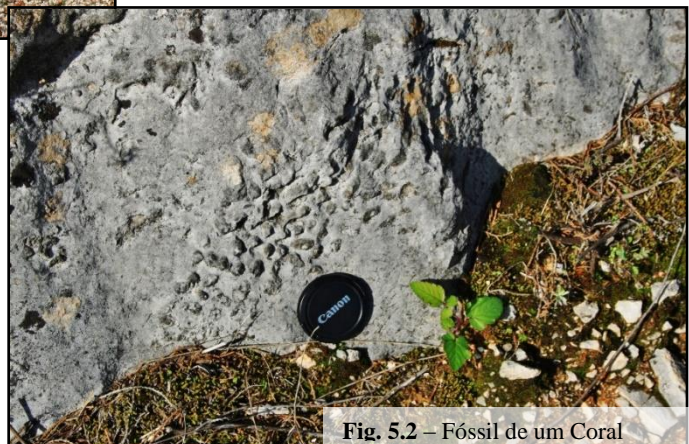


Fig. 5.2 – Fóssil de um Coral

São também visíveis calcários oolíticos de textura grainstone (Fig. 5.3), com menor quantidade de bioclastos, mas com vários tipos de estruturas sedimentares presentes (Fig. 5.4a e b): *cross sets* de baixo ângulo, *ripple marks* e laminação cruzada provocada pela ondulação (ambiente shoreface superior) e por vezes laminação oblíqua (Azerêdo, 2013). Em alguns locais pode-se observar acima dos níveis clásticos de granularidade mais fina e com feixes oblíquos um nível tempestítico (Lag) sem grande estruturação; o fluxo era unidireccional levando à orientação dos fragmentos de crinóides presentes (Fig. 5.5). Para o topo observa-se de novo grainstones com estratificação oblíqua, o que mostra que o fluxo abrandou.



Fig. 5.3 – Calcário oolítico de textura grainstone



Fig. 5.4a – Cross sets de baixo ângulo



Fig. 5.4b – Laminação oblíqua

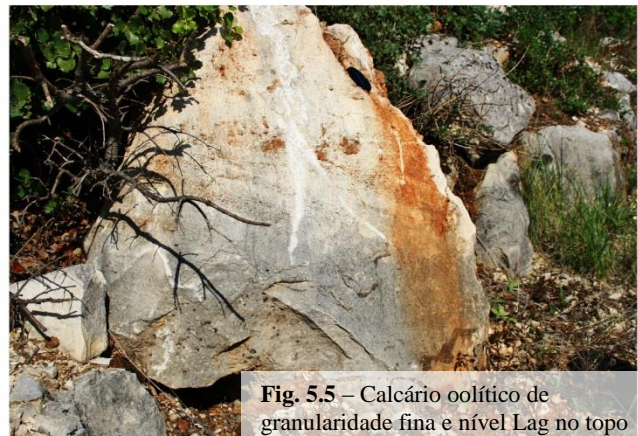


Fig. 5.5 – Calcário oolítico de granularidade fina e nível Lag no topo

Observa-se um contacto erosivo e nos níveis acima temos calcários grainstone e rudstone dominados por bioclastos de grão grosseiro e gradação grosseira (ambiente shoreface inferior), que contém também intraclastos e oncóides com laminação planar ou ligeiramente ondulatória. As unidades de biostromas por vezes variam lateralmente para calcários grainstone (Fig. 5.6)

com bioclastos e intraclastos predominantes, de aspecto amalgamado e desigual que se podem interdigitar uns com os outros (Azerêdo, 2013).

Estas interdigitações horizontais e verticais têm globalmente diferentes graus de susceptibilidade diagenética e, desta forma, poderão ser armadilhas estratigráficas resultantes da diagénese (armadilhas secundárias pós-deposicionais).



Fig. 5.6 – Nível biostroma interdigitado com nível de calcário oolítico

A porosidade dos diversos níveis é diferente. A maior parte dos corpos arenosos (*sandbodies*) e biostromas mostram baixa porosidade, mas há evidências, para além da porosidade primária diferenciada, de casos de alta porosidade ou mesmo excelente nesta litofácies (no entanto com baixa conexão, ou seja, baixa porosidade efectiva e por isso também baixa permeabilidade). Estes exemplos de alta porosidade correspondem a multifases de dissolução/solução secundária tardia normalmente associada à dolomitização (porosidade móldica, intrapartícula e vuggy). Observa-se também por vezes macroporosidade associada a fractura e diaclasamento, em especial em calcários oolíticos (Fig. 5.7 a,b e c).

Existe compactação mecânica e química, no entanto esta é pouco frequente devido a cimentação precoce/multi geracional. É também comum observar nos calcários de litofácies 1 evidências de paragens de sedimentação, *hardgrounds* (Fig. 5.8).



5.2. Amostragem

Para a amostragem dividiu-se o afloramento em diversos sectores (A,B,C,D,E,F e G) para facilitar o estudo. A imagem (Fig. 5.9) ilustra os locais de amostragem e os poços verticais “fictícios” que foram projectados de forma a passar sobre ou próximo do local de amostragem. Em alguns locais foi impossível retirar amostras num eixo vertical, ou devido a uma grande alteração da rocha, o que iria falsear resultados, ou por falta de condições de segurança.

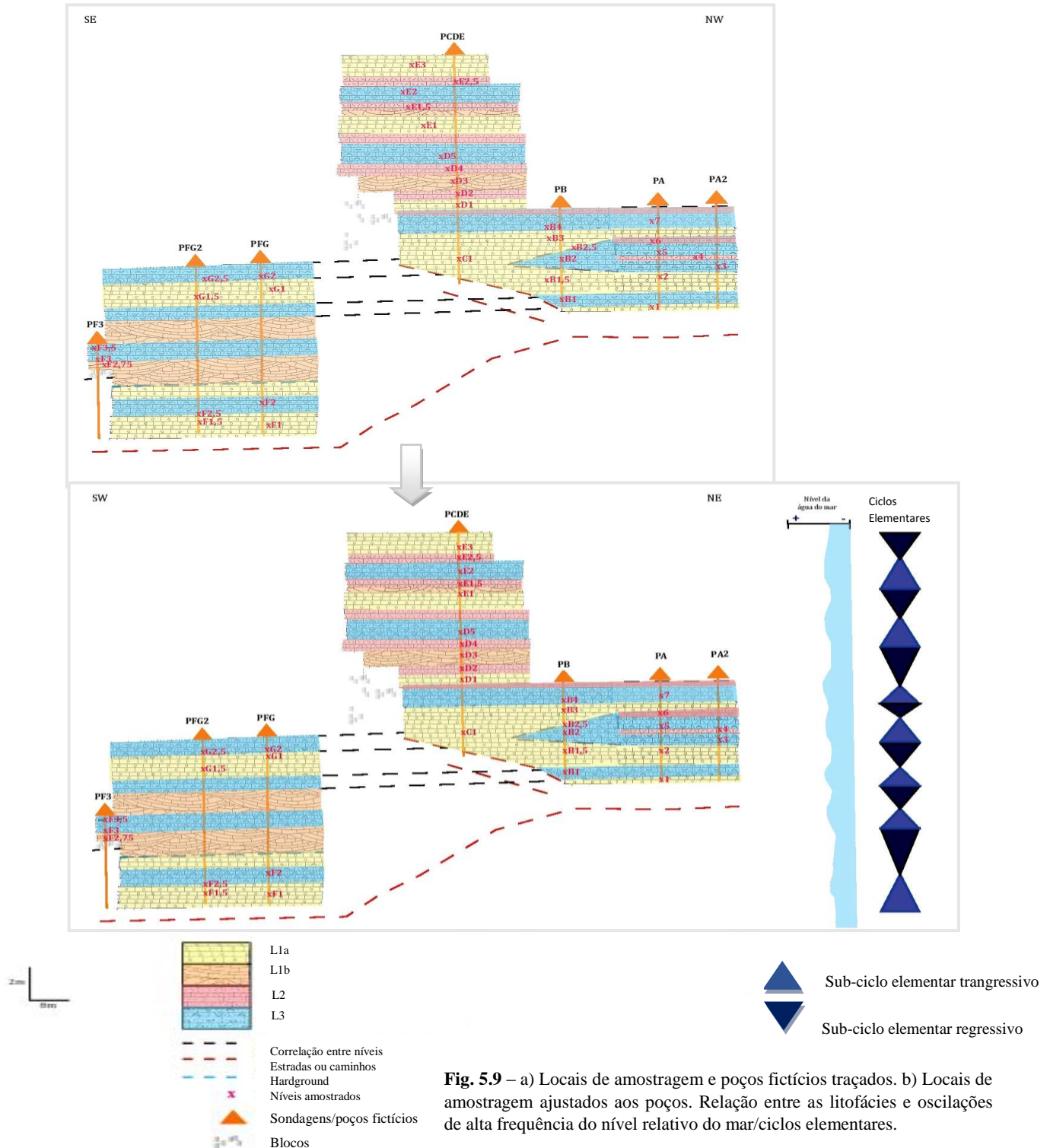


Fig. 5.9 – a) Locais de amostragem e poços fictícios traçados. b) Locais de amostragem ajustados aos poços. Relação entre as litofácies e oscilações de alta frequência do nível relativo do mar/ciclos elementares.

Na Figura b) foi também delineada uma curva de flutuação relativa do nível médio das águas do mar e ciclos elementares associados. A sucessão aflorante na região de Vale Florido (de idade batoniana) corresponde no seu todo à parte inferior de um sub-ciclo transgressivo de 2ª ordem (Fig. 3.8), no entanto à escala do afloramento podem-se observar pequenas oscilações do nível do mar correspondentes a ambiente de rampa interna (litofácies 1) e interface rampa interna/intermédia (litofácies 2 e 3) tendo sido definidos ciclos elementares onde a litofácies 1 está associada a sub-ciclos elementares regressivos e a litofácies 2/3 a sub-ciclos elementares transgressivos.

De seguida são descritas as principais características macroscópicas dos níveis observados em cada sector do afloramento em estudo, bem como os respectivos locais de amostragem (Figs. 5.10 – 5.48). Para melhor leitura, as características de cada nível amostrado são apresentados em formato tipo tabela a seguir às respectivas fotografias de campo.

5.2.1. Sector A



Fig. 5.10 – Locais de amostragem no Sector A (VFJ1 e VFJ2)

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJ1	Calcário oolítico resistente	43 cm
VFJ2	Calcário oolítico, mais fino que VFJ1, também resistente	1,00 m

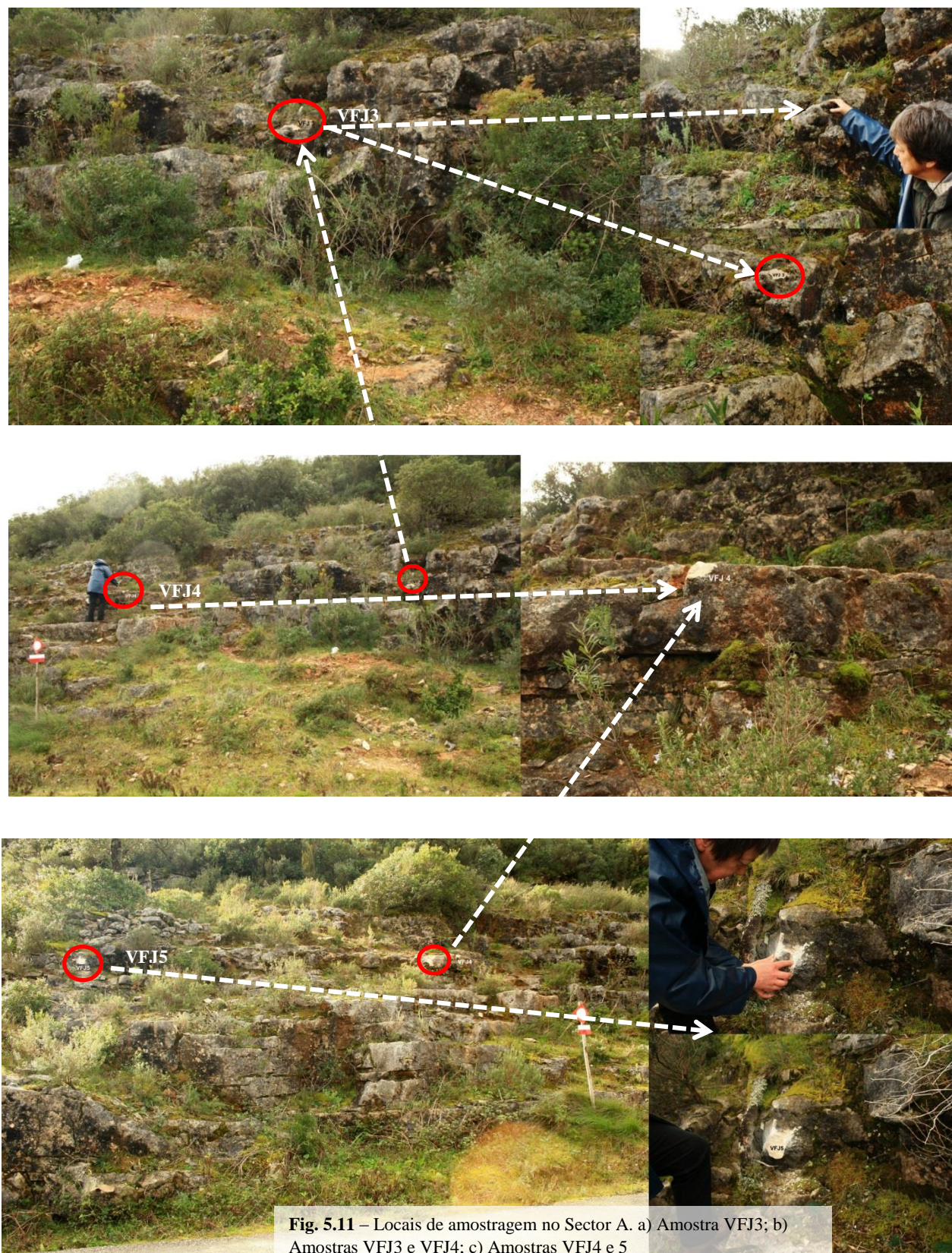




Fig. 5.12 – Local de Amostragem do nível A6 (amostra VFJ6)

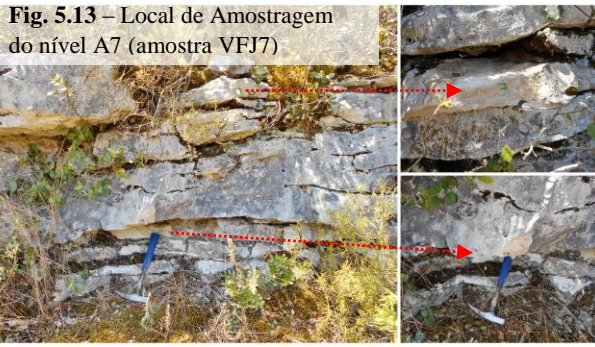


Fig. 5.13 – Local de Amostragem do nível A7 (amostra VFJ7)

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJ3	Nível biostroma mais oolítico para o topo	~35 cm
VFJ4	Nível calciclástico	~25cm
VFJ5	Nível biostroma, com diversos corais. Nível resistente	~45 cm
VFJ6	Nível calciclástico, com intraclastos de grandes dimensões	~65 cm
VFJ7	Nível biostroma, um pouco alterado, não muito resistente	~1,00m

5.2.2 Sector B



Fig. 5.14 – Local de Amostragem do nível B1 (amostra VFJB1)



Fig. 5.15- Fóssil de um coral, na base do nível B1

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJB1	Nível entre o VFJ1 e VFJ2. Nível biostroma mais maciço. Resistente	~1,00m



Fig. 5.16 – Local de amostragem do nível VFJB1,5



Fig. 5.17 – Local de amostragem do nível VFJB2,5

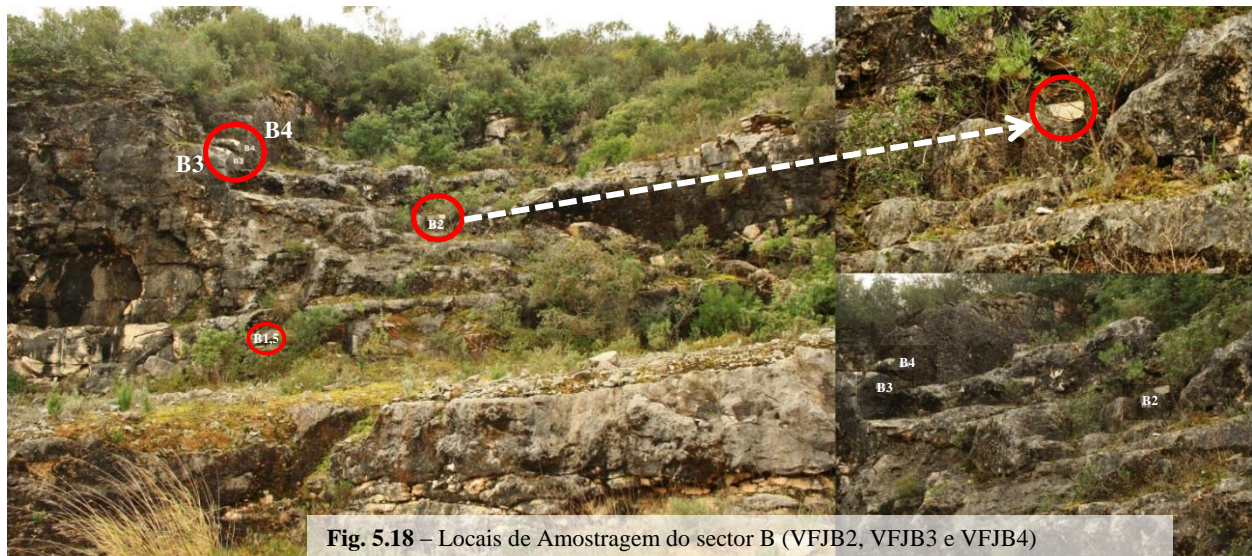
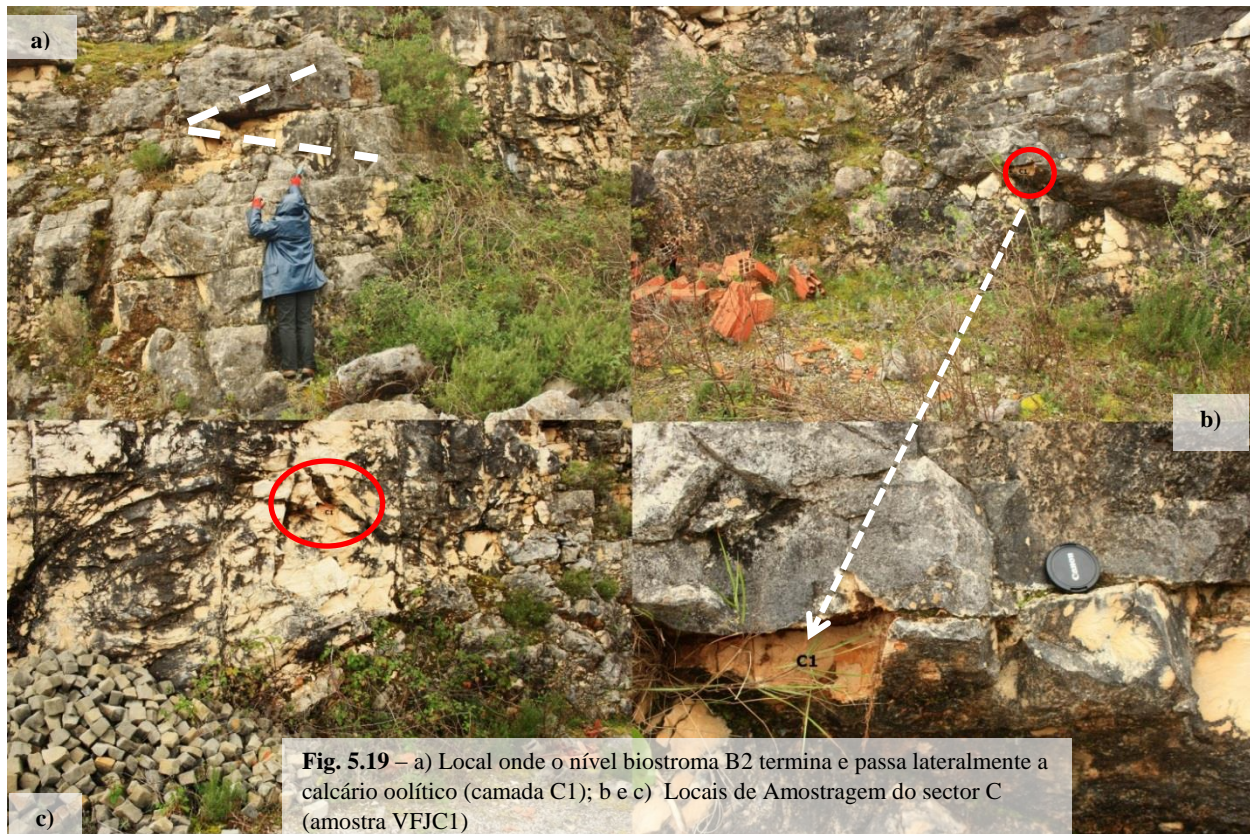


Fig. 5.18 – Locais de Amostragem do sector B (VFJB2, VFJB3 e VFJB4)

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJB1,5	Nível oolítico, mais grosseiro, com alguns intraclastos. Moderadamente resistente	~1.8m
VFJB2	Nível biostroma mais oolítico	~0,8m
VFJB2,5	Topo do nível biostroma, menos oolítico	
VFJB3	Nível oolítico, resistente, recristalizado	~0.9m
VFJB4	Nível biostroma, muito resistente	~1,00m

5.2.3 Sector C



Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJC1	Variação lateral do nível VFJB2. Foi recolhida junto ao contacto de dissolução do fim do biostroma lenticular/calcário oolítico. Amostras um pouco recristalizadas.	~2,6m

5.2.4 Sector D



Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJD1	Calcário oolítico com alguns feixes de estratificação oblíqua fina no topo da camada	~55 cm



Fig. 5.21 – a) Local de amostragem do nível D1 e D2; b) Diferenças granulométricas observáveis dentro do nível D2

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJD 2	Calcário oolítico bioclástico. Nível muito heterogêneo. Vê-se um nível muito grosseiro com bioclastos e um nível menos grosseiro correspondente à matriz.	~3cm – 20 cm



Fig. 5.22 – a) Local de amostragem do nível D3; b) inclinação dos ripples ascendentes

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJD3	Calcário com estruturas sedimentares. Observa-se uma superfície de ondulação – ripples ascendentes, houve sedimentação rápida tendo ficado preservados. Um pouco abaixo vêem-se bioclastos sem orientação, ou seja o fluxo era mais energético e no topo vêem-se crinóides e equinodermes- fluxo tempestítico.	~1,10m

Ainda no sector D3, é possível observar estilólitos em patamar com macroporosidade associada (Fig. 5.23)



Fig. 5.23 – Estilólitos em patamar com macroporosidade associada



Fig. 5.24 – Local de amostragem do nível D4

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJD4	Calcário mais clástico, nível tempestítico	~60 cm

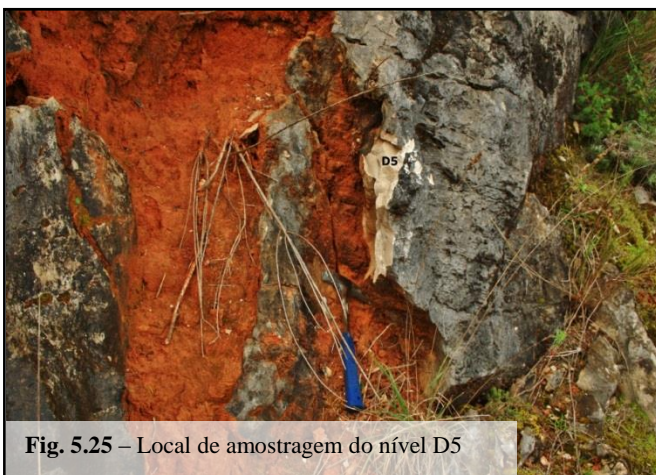


Fig. 5.25 – Local de amostragem do nível D5

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJD 5	Nível biostroma, mais alterado. (<i>sandsheets?</i>)	~1,10m

5.2.5 Sector E



Fig. 5.26 – Graus elevados de alteração presentes no Sector E



Fig. 5.27 – Dissolução e posterior precipitação de calcite

No Sector E é observável alteração extensa das rochas (Fig. 5.26 e 5.27)



Fig. 5.28 – Local de amostragem do nível E1



Fig. 5.29 – Estratificação oblíqua no topo de E1

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJE1	Calcário oolítico, recifal, com um coral presente. No topo podemos ver estratificação oblíqua (~60cm no topo)	~1,7m



Fig. 5.30 – Local de amostragem do nível E1,5

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJE1,5	Calcário calciclástico, moderadamente resistente	~0,5m



Fig. 5.31 – Local de amostragem do nível E2



Fig. 5.32 – Coral presente no nível E2



Fig. 5.33 – Heterogeneidade dentro do nível biostroma.

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJE2	Calcário com biostromas presentes. Heterogeneidade visível a macroscale, a parte inferior possui biostromas mais grosseiros, enquanto que a parte do topo (~40 cm) os biostromas são menos grosseiros e são mais visíveis outros bioclastos.	~1,30



Fig.5.34 – Local de amostragem do nível E2,5

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJE2,5	Calcário calciclástico no topo da camada biostroma.	~0,55



Fig.5.35 – Local de amostragem do nível E3

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJE3	Calcário oolítico com bioclastos.	~1,30m

5.2.6 Sector F

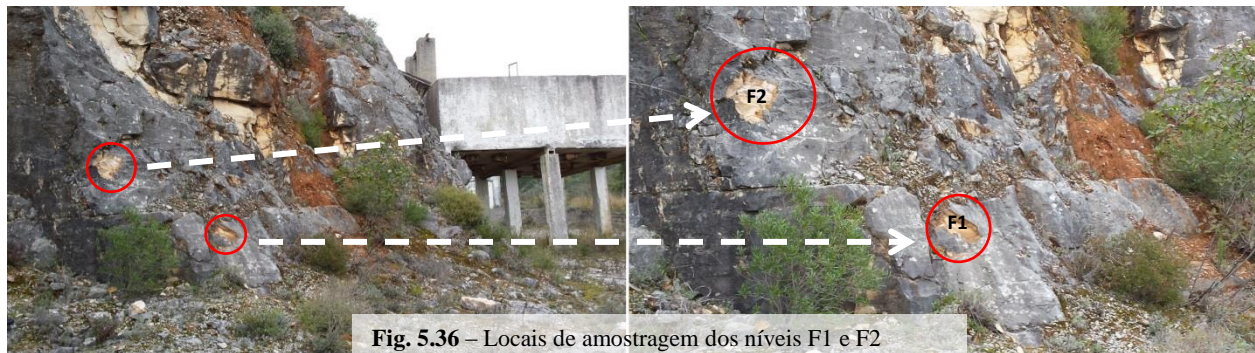


Fig. 5.36 – Locais de amostragem dos níveis F1 e F2

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJF1	Calcário oolítico	~90 cm – 1m
VFJF2	Corpo biostrófico lateralmente varia para calcários oolíticos (variação de espessuras)	~50 cm – 72 cm

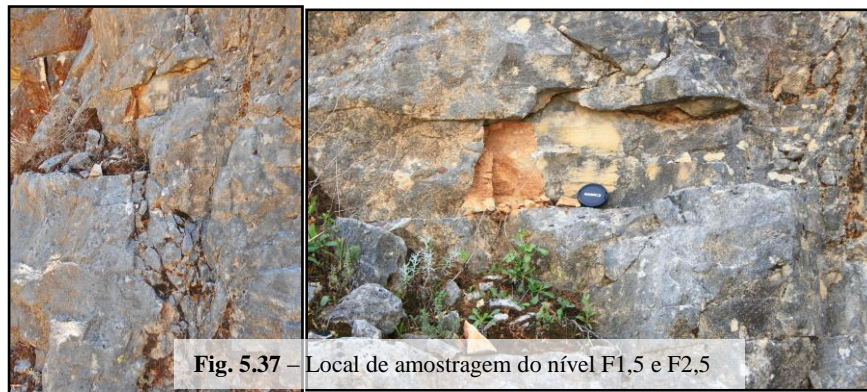


Fig. 5.37 – Local de amostragem do nível F1,5 e F2,5

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJF1,5	Calcário oolítico mais intraclástico. Variação lateral do nível F1	~1m
VFJF2,5	Corpo biostrófico; variação lateral do nível F2. Mais alterado que o outro nível	~70 cm

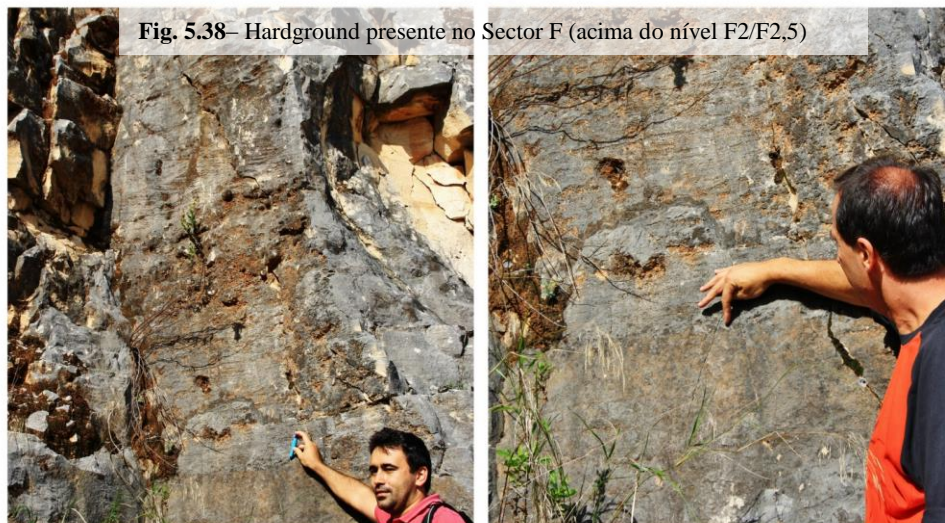


Fig. 5.38 – Hardground presente no Sector F (acima do nível F2/F2,5)

Fig. 5.39– Calcário oolítico com estratificação oblíqua (*cross bedding*)



Fig. 5.40– Calcário oolítico com estruturas sedimentares com um nível biostroma no meio



Fig. 5.41– Local de amostragem dos níveis F2,75 e F3

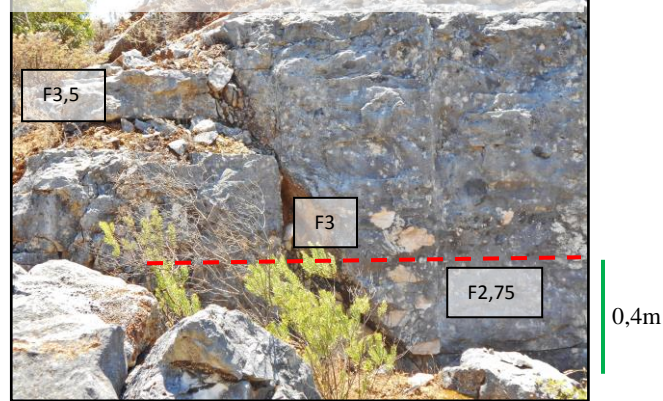


Fig. 5.42– Local de amostragem do nível F3



Fig. 5.43– Nível mais oolítico com corais presentes no nível F3

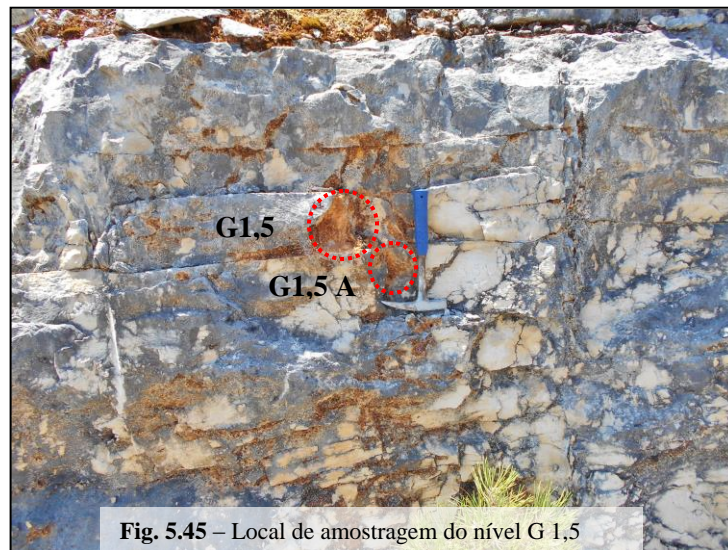


Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJF2,75	Nível oolítico, pouco resistente	~0,4m
VFJF3	Base do corpo biostrófico, um pouco alterado (resistência moderada).	~ 1m
VFJF3,5	Topo do biostroma, mais resistente, possivelmente um pouco recristalizado. Entre o topo e a base deste nível há algumas partes um pouco mais oolíticas.	

5.2.7 Sector G



Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJG1	Calcário oolítico com diversos bioclastos, recristalizado	~1,75 cm



Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJG1,5	Calcário oolítico com estratificação paralela, amostra recolhida no mesmo nível que G1, mas mais a SE, e ligeiramente mais abaixo. Nível mais oolítico com menos bioclastos, pouco resistente (menos resistente que G1)	~1,75 cm



Fig. 5.46- Local de amostragem do nível G2



Fig. 5.47 – Local de amostragem do nível G 2,5



Fig. 5.48– Coral na base do nível G2/G2,5

Nível	Descrição genérica	Espessura do nível
VFJG2	Corpo biostrófico, muito resistente	~1,30 m
VFJG2,5	Variação lateral do nível G2, um pouco mais oolítico, ainda bastante resistente.	~1,30 m

5.3. Descrição petrográfica

5.3.1. Amostra VFJ1 (Sector A – Poço A)

Descrição Mesoscala: A amostra apresenta cor creme quando está seca, mantendo essa coloração quando está húmida.

Calcário oolítico quase puro (Fig. 5.49 A1/2), constituído essencialmente por oóides, com poucos bioclastos (fragmentos de lamelibrânquios, foraminíferos bentónicos.). Estão presentes pequenos estilólitos (Fig. 5.49 A1) de cor alaranjada (ferruginação) e alguns grãos negros (óxidos de ferro?).

Classificação Composicional: oosparite.

Classificação Textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oosparite.

Classificação textural: grainstone (condensada?).

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: equinodermes, fragmentos de lamelibrânquios, foraminíferos bentónicos, crinóide. Ao todo representam cerca de 3% dos grãos da amostra.

Outros elementos figurados carbonatados: essencialmente oóides (~90%), alguns pelóides (6%), e intraclastos em quantidade reduzida (1%).

Notas: calcário oolítico quase puro. Óxidos de ferro abundantes dentro de oóides e interpartícula. Por vezes observa-se o núcleo dos oóides micritizado (Fig.5.49B). Estilólitos presentes do tipo colunar (Fig.5.49C) com alguma porosidade e óxidos de ferro associados. Em alguns locais os oóides encontram-se amalgamados e interpenetrados (Fig. 5.49E).

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- granular xenotópico por vezes drúsico C3- granular hipidiotópico drúsico; C4- poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho freático, marinho pouco profundo e soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, recristalização (?), micritização em pequena quantidade, compactação

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5%- baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 3%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese e mesodiagénese.

Tipos de porosidade: intrapartícula dentro de oóides (Fig. 5.49D) e interpartícula, por vezes associada a estilólitos.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação e dissolução subsequente (intrapartícula); 3) precipitação de cimento drúsico (C2/3); 4) compactação com geração de um estilólito do tipo colunar e alguma dissolução associada, formando porosidade interpartícula junto ao estilólito; 5) Precipitação de cimento poiquilotópico e sintáxico (C4), com inclusões de fragmentos de equinodermes; 6) Precipitação de óxidos de ferro.

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância de aspectos diagenéticos (ou diagenético).

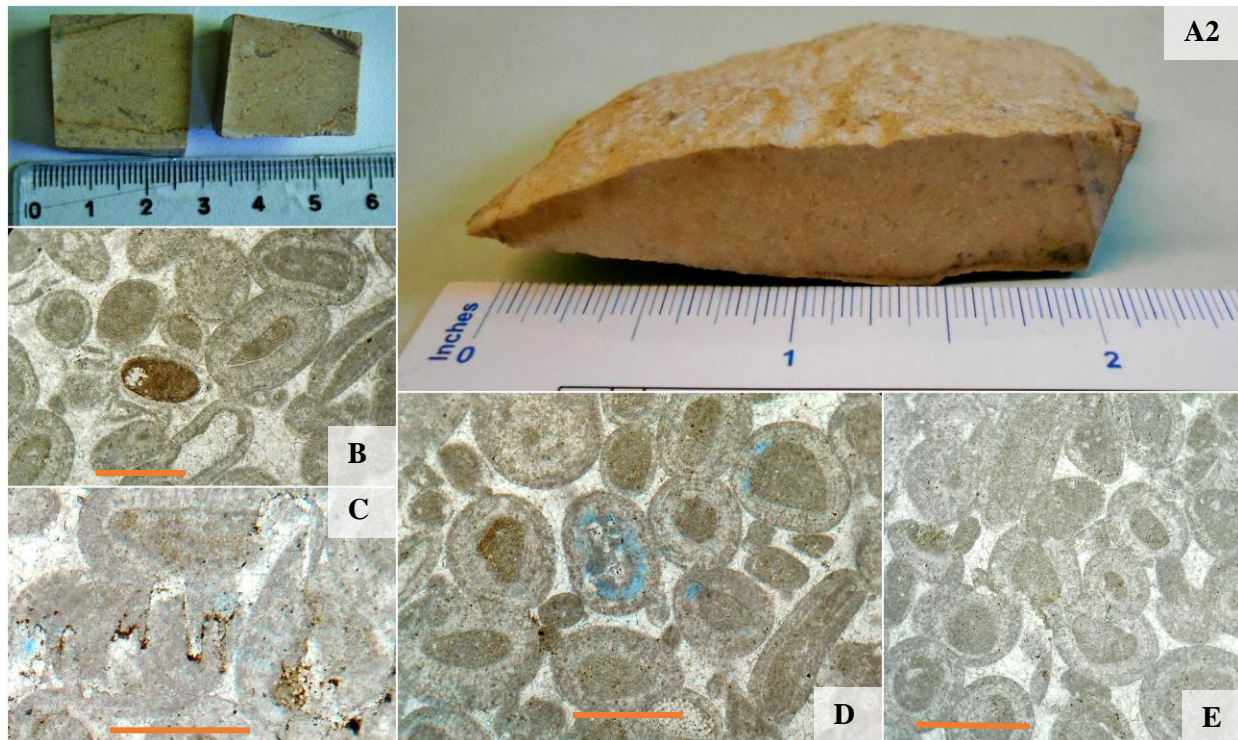


Fig. 5.49 – A1-2) taliscas e amostra de mão do nível VFJ1; B) micritização no núcleo de um oóide; C) estilólito colunar com alguma porosidade interpartícula D) porosidade intrapartícula, dentro de oóides; E) oóides interpenetrados e fracturação.

~0,5mm

5.3.2. Amostra VFJ2 (Sector A – Poço A)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme, quer seca quer quando está húmida.

Calcário de granularidade muito fina (Fig. 5.50), essencialmente constituído por pelóides e oóides, com alguns intraclastos de pequena dimensão. A amostra não apresenta grande estruturação.

Classificação composicional: pelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1



Fig. 5.50– Amostra de mão do nível VFJ2.

5.3.3. Amostra VFJ3 (Sector A – PoçoA2)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca e creme quando húmida.

Calcário com diversos intraclastos e bioclastos (fragmentos de lamelibrânquios, fragmentos de equinodermes, coraliários, algas calcárias) numa matriz oolítica (Fig. 5.51A).

Classificação composicional: oobiosparite;

Classificação textural: rudstone

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: packstone/rudstone.

Litofácies: 3.

Bioclastos identificáveis: coraliário (Fig. 5.51B), fragmentos de equinodermes, algas calcárias, gastrópodes, serpulídeos. A biofase corresponde a mais de 50% da rocha.

Outros elementos figurados carbonatados: oóides maioritariamente e alguns intraclastos.

Fases de cimentação (Fig. 5.51C/D): C1-fibroso; C2-laminar C3- pelóidico; C4-granular xenotópico por vezes drúsico C5- poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho freático e de soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, micritização, recristalização (?).

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5% - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: ~3%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénes e mesodiagénes.

Tipos de porosidade: essencialmente intrapartícula (Fig. 5.51E/F) e intercristalina.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1 e C2); 2) cimentação pelóidica (C3) e micritização com geração de alguma porosidade intrapartícula; 3) dissolução e criação de porosidade; 4) cimentação granular e cimentação drúsica (C4) colmatando grande parte da porosidade gerada em 3; 5) cimentação sintáxica e poiquilotópica (C5).

Tipo de reservatório: híbrido 1.

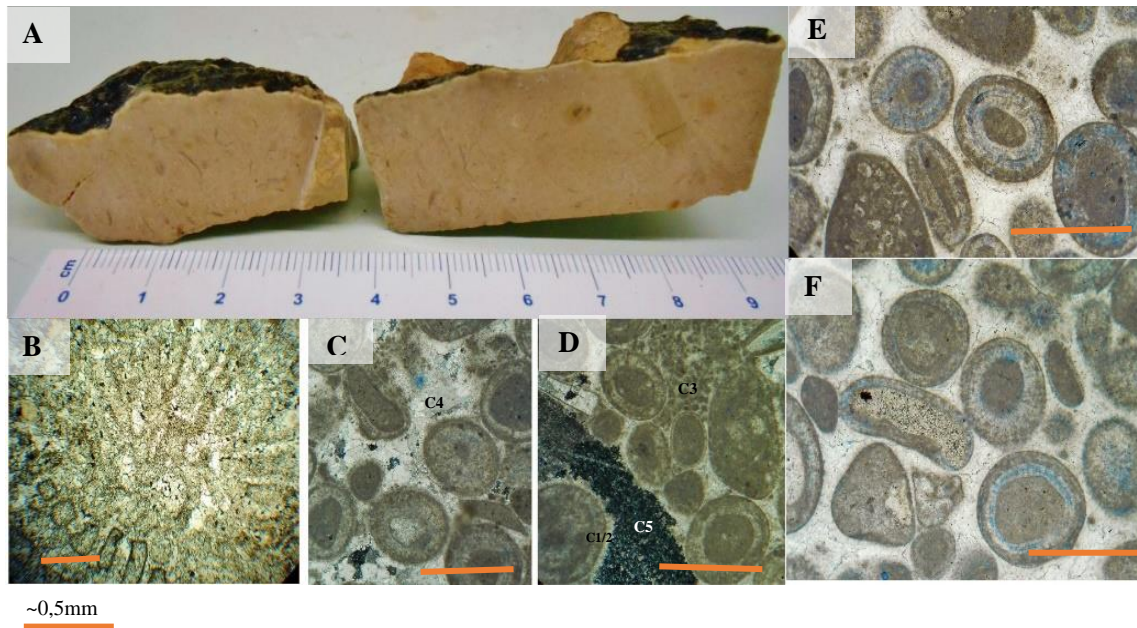


Fig. 5.51. – A) amostra de mão do nível VFJ3; B) coraliário; C e D) tipos de cimento; E e F) exemplos da porosidade intrapartícula presente.

5.3.4. Amostra VFJ4 (Sector A – Poço A2)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca e creme quando húmida.

Amostra com uma matriz mais fina que a amostra anterior (VFJ3), mais pelódica, também com vários intraclastos e bioclastos (fragmentos de lamelibrânquios, algas calcárias?) mas de menor dimensão (Fig. 5.52A). Podem-se também observar agregados de litoclastos. Alguns dos clastos apresentam coloração alaranjada/rosada (poderão ter sofrido alguma ferruginização)

Classificação composicional: oopelintrasparite.

Classificação textural: packstone/grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oolitrabiosparite.

Classificação textural: grainstone; rudstone?

Litofácies: 2.

Bioclastos identificáveis: equinodermes, foraminíferos, gastrópodes, algas calcárias(?), crinóides (?).

Outros elementos figurados carbonatados: oóides, peloides e intraclastos.

Notas: observam-se alguns bioclastos que foram dissolvidos e preenchidos por peloides e calcite (Fig. 5.52B).

Fases de cimentação (Fig. 5.52 C/D/E): C1-laminar C2- em ponte; C3- drúsico e granular xenotópico; C5- poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho freático, meteórico vadoso (?), soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: compactação, dissolução, cimentação, micritização (nos oóides).

Classificação qualitativa da porosidade: 0-2% - nula.

Estimativa da porosidade absoluta: 1-2%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese e mesodiagénese.

Tipos de porosidade: intrapartícula e intercrystal.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) cimentação em ponte (C2); 3) compactação e dissolução; 4) cimentação drúsica e granular (C3); 5) dissolução tardia e precipitação de cimento sintáxico e poiquilotópico (C4); 6) ferruginização de algumas partículas.

Tipo de reservatório: diagenético.

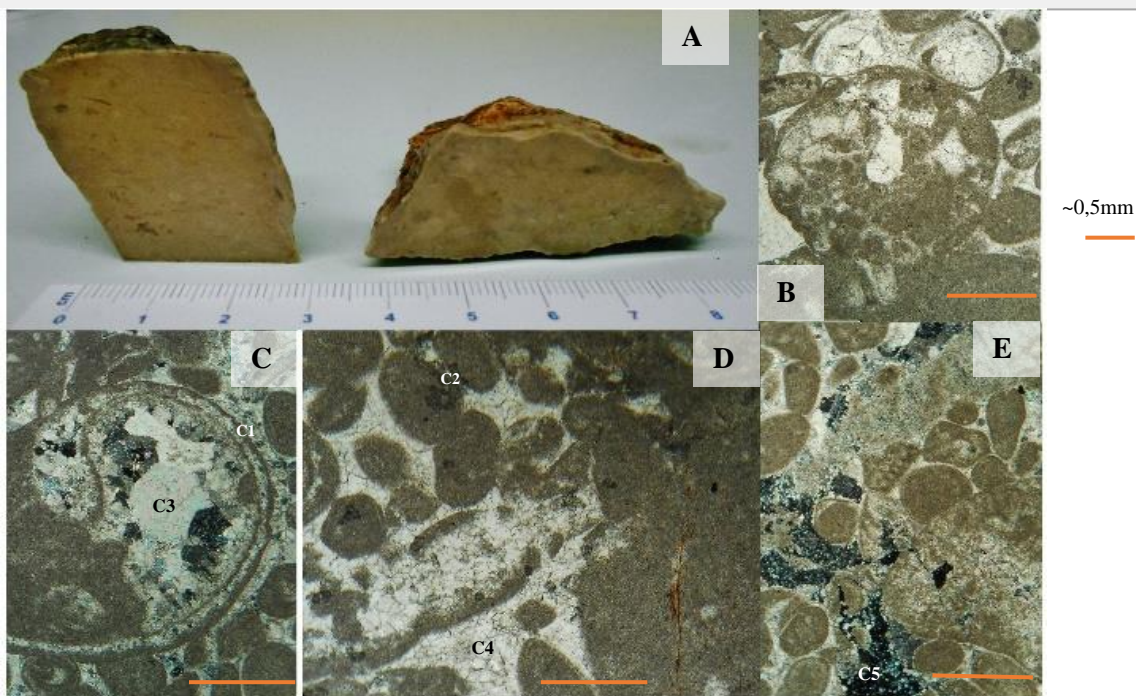


Fig. 5.52. – A) amostra de mão do nível VFJ4; B) bioclasto que foi posteriormente preenchido por pelóides e calcite; C,D e E) tipos de cimento; na imagem D pode-se também observar um litoclasto com alguma ferrugem associada; na imagem E pode-se observar oóides fracturados, essa fractura foi depois preenchida por cimento.

5.3.5. Amostra VFJ5 (Sector A – Poço A)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca e creme quando húmida.

Calcários com fragmentos de coraliários numa matriz essencialmente oolítica e pelóidica (Fig. 5.53A), são também observáveis intraclastos e outros bioclastos (fragmentos de gastrópodes, estromatopóridos? lamelibrânquios). Alguma calcite encontra-se recristalizada essencialmente nos bioclastos/intraclastos.

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: framestone?

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: framestone?/cementstone?

Litofácies: 3

Bioclastos identificáveis: corais (coraliários) (Fig. 5.53 B/C/E), equinodermes, gastrópodes, algas calcárias (Fig. 5.53D).

Outros elementos figurados carbonatados: oóides, pelóides e intraclastos.

Fases de cimentação: C1- fibroso C2- laminar; C3- pelóidico; C4 – granular xenotópico/hipidiotópico drúsico; C5- sintáxico.

Ambiente diagenético: meteórico freático, marinho freático.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, dissolução, micritização.

Classificação qualitativa da porosidade: 0-2% - nula.

Estimativa da porosidade absoluta: 0,5%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne.

Tipos de Porosidade: interpartícula.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1,C2); 2) cimentação pelóidica (C3); 3) compactação e dissolução; 4) cimentação granular e drúsica (C4) colmatando praticamente toda a porosidade criada em 3; 5) cimentação sintáxica (C5).

Tipo de reservatório: híbrido 1.

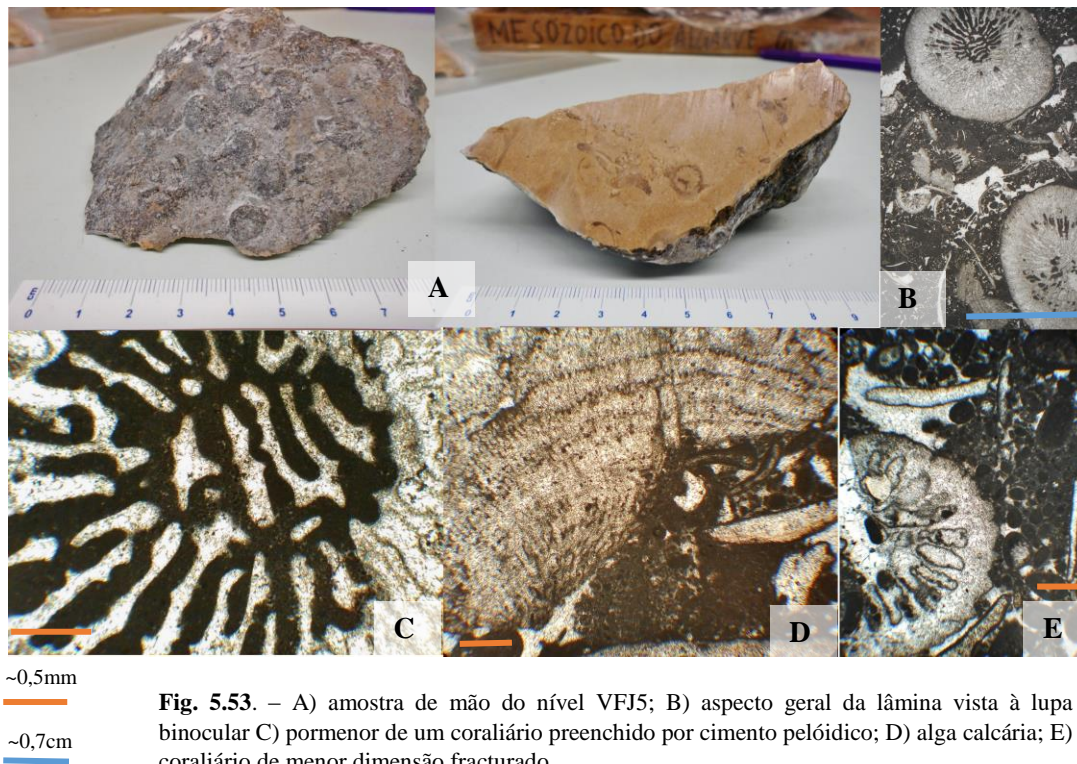


Fig. 5.53. – A) amostra de mão do nível VFJ5; B) aspecto geral da lâmina vista à lupa binocular C) pormenor de um coraliário preenchido por cimento pelóidico; D) alga calcária; E) coraliário de menor dimensão fracturado.

5.3.6. Amostra VFJ6 (Sector A – Poço A)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor bege/esbranquiçada quando seca e bege quando húmida.

Calcários calciclástico (Fig. 5.54), mais grosseiro com intraclastos de grandes dimensões (o maior tem cerca de 1,5 cm) numa matriz essencialmente oolítica (ou oolítica e pelóidica). Alguns grãos têm um tom rosado e houve alguma recristalização da calcite.

Classificação composicional: oointrasparite.

Classificação textural: rudstone.

Litofácies: 2.



Fig. 5.54 – Amostra de mão do nível VFJ6.

5.3.7. Amostra VFJ7 (Sector A – Poço A)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor castanha clara quando seca, mantendo essa coloração quando está humedecida.

Calcário com diversos bioclastos (Fig. 5.55), que incluem coraliários e algas calcárias e intraclastos numa matriz oolítica e pelóidica. São observáveis agregados de oóides e intraclastos, bem como estilólitos alguns dos quais se encontram preenchidos por calcite e alguns óxidos de ferro.

A amostra apresenta porosidade moldada? e interpartícula? dispersa e não muito abundante (~2-3%)

Classificação composicional: oobiointrasparite.

Classificação textural: rudstone?

Litofácies: 2/3



Fig. 5.55 – Amostra de mão do nível VFJ7.

5.3.8. Amostra VFJB1 (Sector B – Poço B)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme/esbranquiçada quando seca e creme quando húmida.

Amostra com bioclastos (fragmentos de lamelibrânquios, coraliários identificáveis) e intraclastos abundantes numa matriz oolítica e pelóidica (Fig. 5.56 A).

Classificação composicional: oobiointrasparite.

Classificação textural: rudstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oolítico/bioturbado.

Classificação textural: packstone/rudstone.

Litofácies: 3 (?).

Bioclastos identificáveis: fragmentos de lamelibrânquios, equinodermes, foraminíferos bentônicos, gastrópodes, coraliários (Fig. 5.56 C).

Outros elementos figurados carbonatados: oóides, intraclastos e pelóides bastante abundantes.

Notas: diferenças granulométricas – níveis mais finos (pelóidicos) intercalados com níveis mais grosseiros (oóides, intraclastos). Em algumas zonas os pelóides encontram-se amalgamados. Observam-se “cristais dente de cão”. Recristalização acentuada (?).

Fases de cimentação (Fig. 5.56 B/D/E): C1- laminar; C2- pelóidico; C3-dente de cão e drúsico; C4-mosaico e granular; C5- sintático.

Ambiente diagenético: marinho freático e soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, compactação, cimentação, recristalização.

Classificação qualitativa da porosidade: nula- 0-2%.

Estimativa da porosidade absoluta: 1%.

Tempo de formação da porosidade: deposicional.

Tipos de porosidade: intrapartícula.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) cimentação pelóidica (C2); 3) compactação e dissolução; 4) cimentação drúsica e dente de cão (C3) que colmata praticamente toda a porosidade gerada em 3; 4) cimentação granular e em mosaico (C4); 5) dissolução tardia e precipitação de cimento sintático (C5).

Tipo de reservatório: diagenético

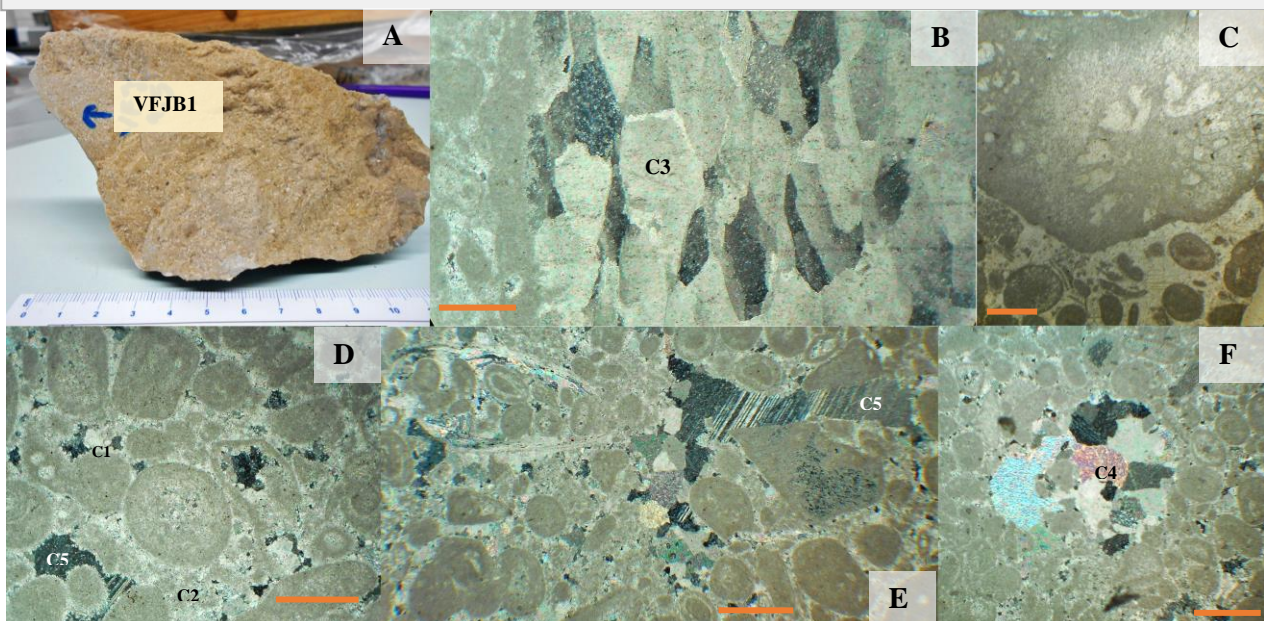


Fig. 5.56. – A) amostra de mão do nível VFJB1; B) cristais dente de cão C) fragmento de coraliário; D, E e F) tipos de cimento presentes.

~0,5mm

5.3.9. Amostra VFJB1.5 (Sector B – Poço B)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca, mantendo essa coloração quando húmida.

Calcário oolítico com bastantes intraclastos e alguns bioclastos (lamelibrânquios). Tem alguma estruturação definida por diferenças granulométricas entre níveis mais oolíticos e níveis mais intraclásticos. Observam-se pequenas fracturas (Fig. 5.57 A1/2).

Lateralmente corresponde ao nível A2 (VFJ2), sendo mais grosseiro que este.

Classificação composicional: oointrasparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiooncosparite.

Classificação textural: grainstone a rudstone.

Litofácies: 1/2 .

Bioclastos identificáveis: equinodermes, algas calcárias (Fig. 5.56 G/H), foraminíferos bentónicos, crinóides, gastrópodes.

Outros elementos figurados carbonatados: oóides abundantes, oncóides e litoclastos

Notas: Algumas partículas encontram-se ferruginizadas e com óxidos de ferro, possivelmente correspondentes a pirite (Fig. 5.56 B/C). Observam-se partículas quebradas com lamelas deslocadas (Fig. 5.56 E/F), grãos interpenetrados e agregados de grãos. Estratificação de baixo ângulo marcada por diferenças granulométricas entre níveis mais oolíticos e níveis mais bioclásticos/oncolíticos. Observam-se veios preenchidos por calcite.

Fases de cimentação: C1-laminar; C2- drúsico; C3-granular xenotópico/hipidiotópico; C4 – sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, compactação, micritização.

Classificação qualitativa da porosidade: 2- 5 % - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: ~2-3% .

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne-mesodiagéne.

Tipos de porosidade: intrapartícula (Fig. 5.56 B/C/D/F) e intercristal

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação e dissolução associada; 3) cimentação drúsica (C2) e granular (C3); 4) micritização e geração de alguma porosidade intrapartícula; 5) precipitação do cimento sintáxico(C5); 5) dissolução tardia e precipitação de óxidos de ferro.

Tipo de reservatório: diagenético.

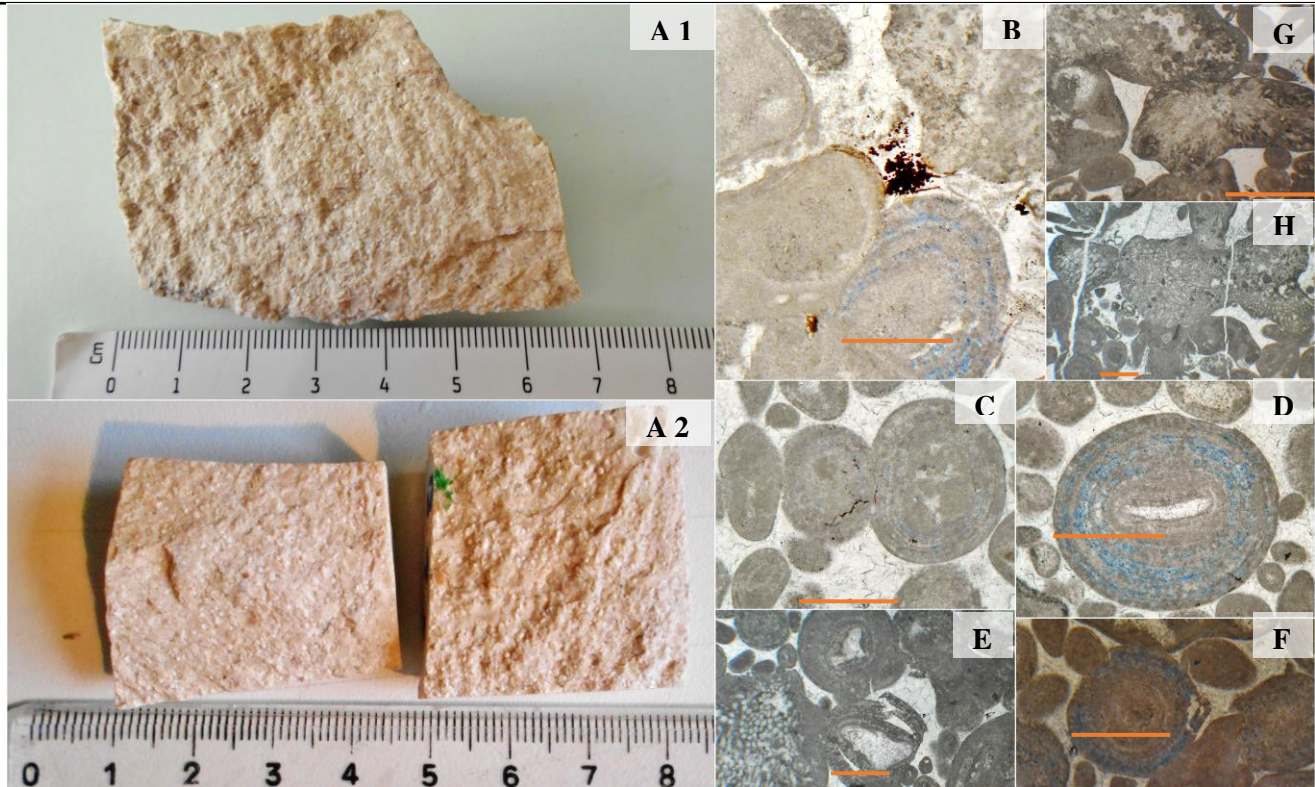


Fig. 5.57 – A) amostra de mão (1) e taliscas (2) do nível VFJB1,5; B) óxidos de ferro presentes (pirite?); C) óxidos de ferro a preencher uma microfractura dentro de um oóide, pode-se observar também porosidade intrapartícula dentro dos dois oóides interpenetrados; D) porosidade intrapartícula dentro de um oóide grosseiro (~1mm); E-F) exemplos de oóides fracturados, com lamelas deslocadas, em F o oóide tem porosidade intrapartícula associada; G-H) exemplos de bioclastos (algas calcárias) presentes na lâmina.

~0,5mm

5.3.10. Amostra VFJB2/B2.5 (Sector B – Poço B)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme/esbranquiçada quando seca, e creme quando húmida.

A amostra B2 (Fig. 5.58A), é essencialmente constituída por oóides, tendo intraclastos também abundantes; assemelha-se a um calcário oolítico. Estão presentes estilólitos na amostra.

A amostra B2,5 (Fig 5.58B) tem abundantes bioclastos e intraclastos (de cor esbranquiçada) numa matriz oolítica, veem-se veios muito grosseiros com calcite recristalizada (houve dissolução e precipitação de calcite dentro dos veios). Observam-se estilólitos com ferruginização associada.

A amostra B2, foi retirada da base de um nível biostroma acima de B1,5, enquanto que B2,5 foi retirado do topo dessa unidade. No entanto em nenhuma das amostras foram observados corais, possivelmente por estarem já em zonas de transição ou por representarem mais a matriz desse nível.

Classificação composicional: oointrasparite (B2); oobiointrasparite (B2,5).

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1 (B2); 2 (B2,5).

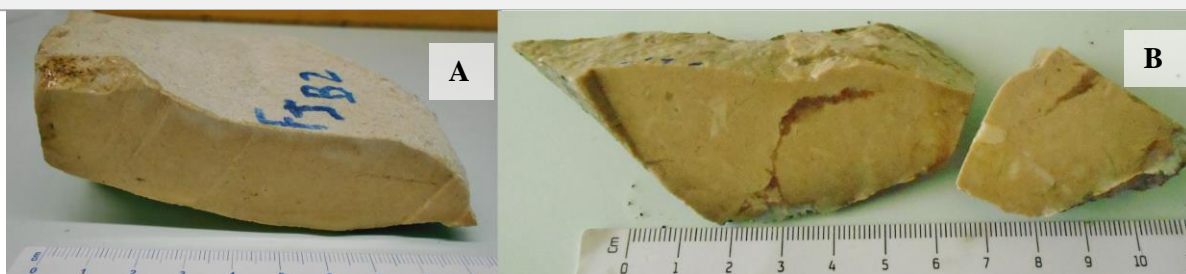


Fig. 5.58 – Amostra de mão do nível VFJB2 (A) e B2,5 (B).

5.3.11. Amostra VFJB3/B3 (A) (Sector B – Poço B)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme/esbranquiçado quando seca e creme quando húmida.

Calcário oolítico (Fig. 5.59A), os clastos possuem alguma estruturação (pequenas diferenças de granularidade).

Estão presentes bioclastos e intraclastos em pequena quantidade, e observam-se alguns veios de calcite e estilólitos.

Os estilólitos apresentam uma coloração alaranjada (ferruginização?).

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: foraminíferos, gastópodes, fragmentos de lamelibrânquios, algas calcárias. Em B3 a biofase é cerca de 30% enquanto que em B3 (A) é cerca de 5%.

Outros elementos figurados carbonatados: oóides e pelóides em grande abundância, alguns intraclastos

Notas: diferentes graus de empacotamento, em B3 parece ter havido muito mais compactação que em B3 (A). Em B3 os oóides encontram-se mais micritizados (Fig 5.59B) que na lâmina B3 (A). Na lâmina B3 há uma maior percentagem de bioclastos e intraclastos; por vezes alguns desses bioclastos apresentam pelóides no seu interior (Fig. 5.59D). É possível observar estratificação paralela em B3 (Fig. 5.59C).

Fases de cimentação (Fig. 5.59 F/G): C1-fibroso? C2-laminar; C3- drúsico; C4-granular xenotópico/hipidiotópico; C5- poiquilótópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho vadoso, marinho freático, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: B3- dissolução, compactação, cimentação, micritização, recristalização. B3 (A) - cimentação, dissolução, recristalização.

Classificação qualitativa da porosidade: 0-2%-nula.

Estimativa da porosidade absoluta: B3-1%; B3 (A) – 0,5% .

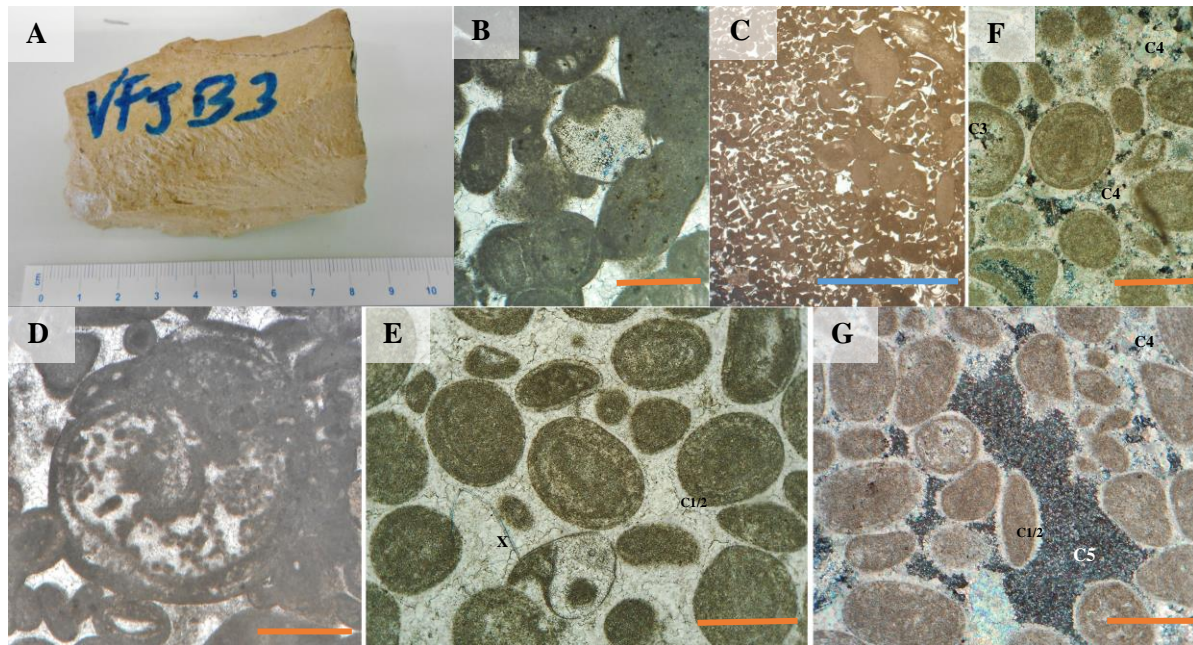
Tempo de formação da porosidade: deposicional e eodiagéne.

Tipos de porosidade: B3 – intrapartícula (Fig. 5.59 B) e intercristal; B3 (A) - intrapartícula (Fig. 5.59 E).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1/2); 2) compactação e dissolução associada; 3) cimentação drúsica (C3) e granular (C4); 4) precipitação do cimento poiquilótópico e sintáxico(C5); 5) dissolução tardia e preenchimento de alguns poros por óxidos de ferro.

Tipo de reservatório: B3 – diagenético; B3 (A) – híbrido 1



~0,5mm

~0,3cm

Fig. 5.59 – A) amostra de mão e taliscas do nível VFJB3; B) porosidade intrapartícula dentro de um fragmento de equinoderme observado na Lâmina B3; C) estratificação paralela marcada por diferenças de granulometria na lâmina B3 vista à lupa binocular. D) gastrópode parcialmente preenchido por pelóides observado na lâmina B3. E) lâmina B3 (A) – pode-se observar no local X porosidade no bordo de um grão que foi dissolvido e posteriormente preenchido por calcite. F e G) fases de cimentação observadas na lâmina B3 (A).

5.3.12. Amostra VFJB4 (Sector B – Poço B)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor branca quando seca e creme quando húmida.

Calcário mais grosseiro (Fig. 5.60A), constituído essencialmente por bioclastos e intraclastos numa matriz oolítica. Estão presentes alguns veios de calcite e nota-se alguma recristalização.

Classificação composicional: intrabiosparite.

Classificação textural: rudstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oopelbiosparite.

Classificação textural: grainstone/rudstone (?).

Litofácies: 2?

Bioclastos identificáveis: fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes, foraminíferos bentônicos, coraliários (Fig. 5.60 B), algas calcárias (?) (Fig. 5.60 C). Biofase corresponde a cerca de 50% dos grãos.

Outros elementos figurados carbonatados: oóides e pelóides em grande abundância, alguns intraclastos.

Notas: diferentes graus de empacotamento entre os grãos.

Fases de cimentação (Fig. 5.60 D/E): C1- laminar; C2- granular xenotópico por vezes drúsico; C3- granular hipidiotópico, C4- poiquilótópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, marinho freático, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação.

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5% - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 2-3%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese.

Tipos de porosidade: intrapartícula, interpartícula e moldada.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação e dissolução associada; 3) cimentação granular e drúsica (C2 e C3); 4) precipitação de cimento poiquilótópico e sintáxico (C4); 5) dissolução tardia e preenchimento de poros por óxidos de ferro

Tipo de reservatório: Híbrido 1, com predominância de aspectos diagenéticos (ou diagenético)

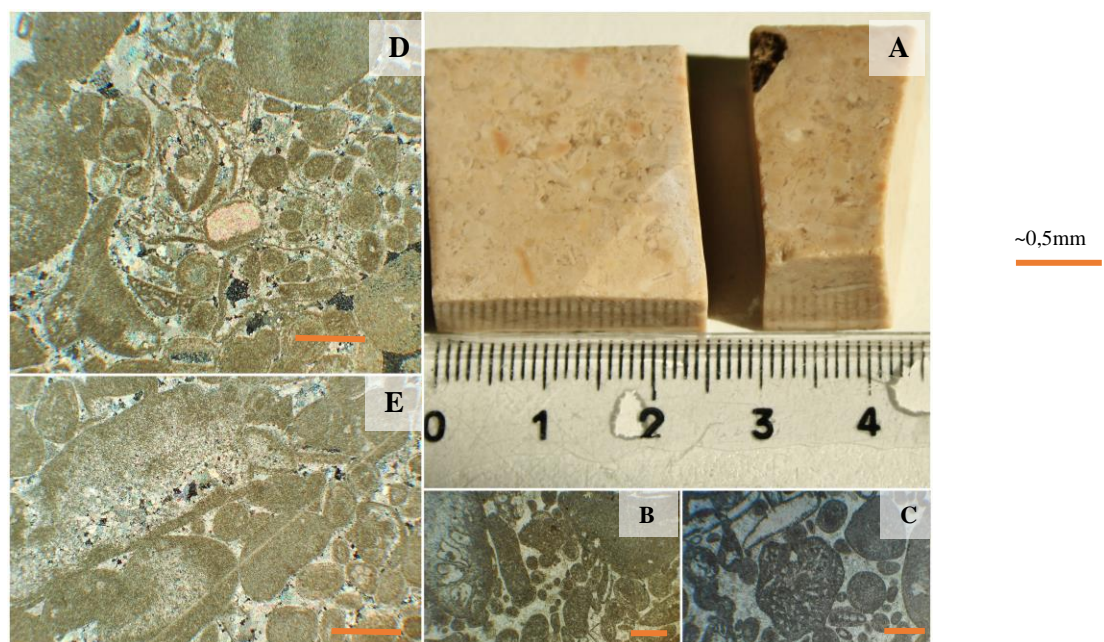


Fig. 5.60. – A) amostra de mão do nível VFJB4; B e C) exemplos de bioclastos presentes, em C pode-se observar um coraliário e em D uma alga calcária (?); D e E) alguns dos tipos de cimento presentes.

5.3.13. Amostra VFJC1/C1 (A) (Sector C – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor bege, mantendo essa cor quer quando está seca quer quando está húmida.

Calcário oolítico quase puro (Fig. 5.61A). Observam-se alguns intraclastos e bioclastos em muito pequena quantidade.

Existem algumas pequenas fracturas e estilólitos e alguns têm tom alaranjado (sofreram ferruginização).

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: foraminíferos bentónicos e fragmentos de lamelibrânquios, crinóides (Fig. 5.61B), algas calcárias (Fig. 5.61C).

Outros elementos figurados carbonatados: oóides maioritariamente, pelóides também abundantes e alguns intraclastos.

Notas: estratificação oblíqua (Fig 5.61 F) marcada por diferenças granulométricas, faixas mais grosseiras (oolíticas) intercaladas com faixas com clastos mais finos (mais pelóidicas). Na Lâmina C1 observa-se um estilólito.

Fases de cimentação (Fig. 5.61 E) : C1- laminar; C2-drúsico; C3- granular xenotópico; C4-poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: compactação, dissolução, cimentação.

Classificação qualitativa da porosidade: C1: 2-5% - baixa; C1 (A): 0-2% - nula.

Estimativa da porosidade absoluta: C1 -3%; C1 (A) - 1%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne e mesodiagéne.

Tipos de Porosidade: C1- intercrystal, intrapartícula e interpartícula associada ao estilólito (Fig. 5.61D); C1 (A) - intrapartícula, intercrystal.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a baixa

Interpretação da evolução diagenética da rocha: cimentação calcítica (C1 e C2); 2) compactação e dissolução associada, com formação de estilólito na lâmina C1; dissolução intrapartícula (p.ex em fragmentos de gastrópodes) gerando porosidade secundária por vezes colmatada posteriormente por C3; 3) precipitação de cimento poiquilotópico e sintáxico (C4); 4) dissolução tardia e precipitação de óxidos de ferro.

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância diagenética.

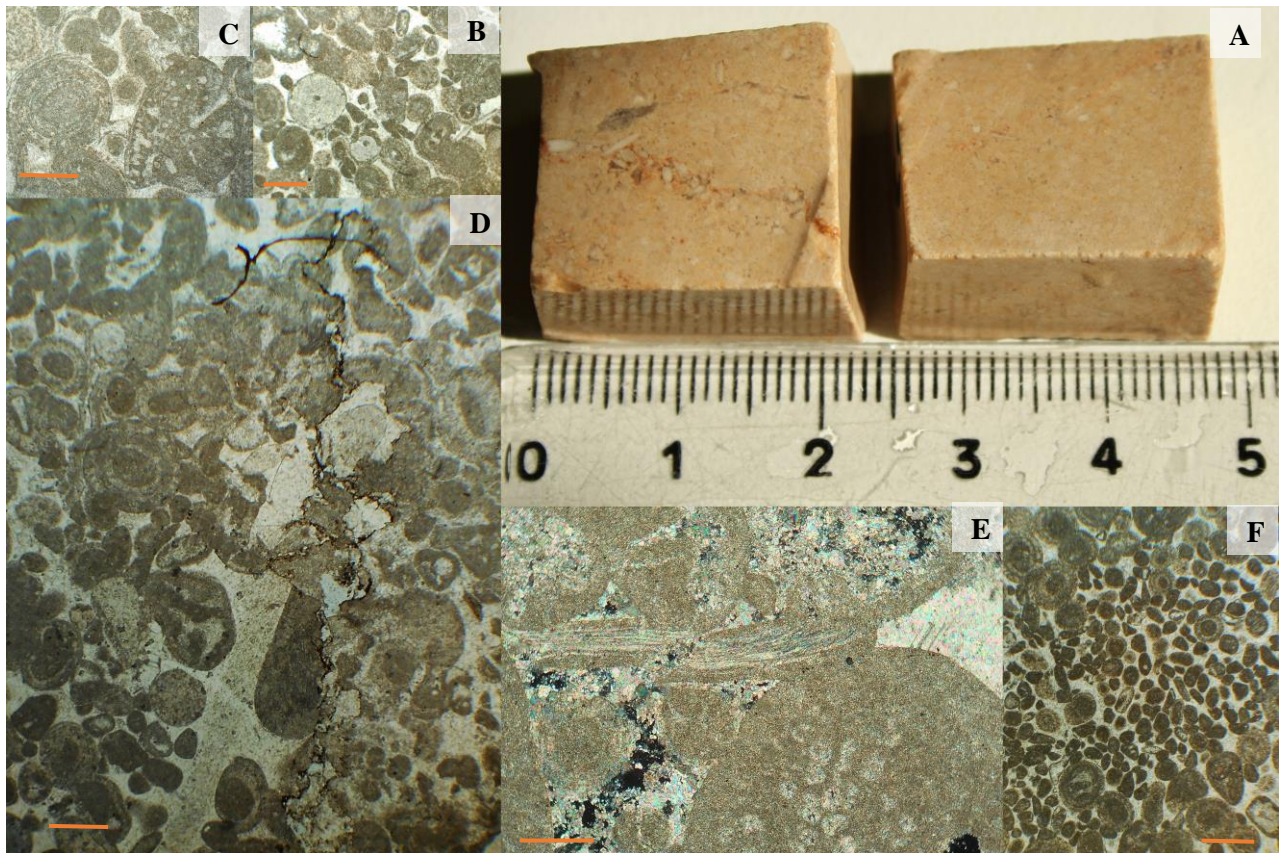


Fig. 5.61. – A) amostra de mão do nível VFJC1; B e C) alguns dos bioclastos presentes; em C pode-se observar uma alga calcária e em B crinóides; D) estilólito presente na lâmina C1, com porosidade interpartícula associada; E) alguns dos tipos de cimento presentes, pode-se também observar fracturação de partículas, estando a fissura preenchida por calcite; F) diferenças granulométricas, estratificação oblíqua.

~0,5mm

5.3.14. Amostra VFJD1 (Sector D – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme, mantendo a coloração quer quando está seca quer húmida.

Calcário de granularidade muito fina (Fig. 5.62A), essencialmente pelóidico com alguns intraclastos de pequena dimensão. É uma amostra muito compacta (Tight).

Classificação composicional: pelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: pelsparite

Classificação textural: grainstone

Litofácies: 1

Bioclastos identificáveis: gastrópodes, foraminíferos bentônicos, lamelibrânquios, equinodermes, crinóides e algas calcárias (Fig. 5.62D).

Outros elementos figurados carbonatados: pelóides predominantemente e oóides de tamanho reduzido

Notas: Estilólito presente. Alguns pelóides/oóides encontram-se amalgamados. Clastos orientados.

Fases de cimentação (Fig. 5.62 E): C1- laminar; C2- dente de cão e drúsico; C3-granular xenotópico/ hipidiotópico; C4- poiquilotópico e sintáxico (com inclusões de equinodermes).

Ambiente diagenético: marinho freático, meteórico freático, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: compactação, dissolução, cimentação.

Classificação qualitativa da porosidade: 2- 5%- baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 2%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne e mesodiagéne.

Tipos de Porosidade: móldica (de pelóides); interpartícula (Fig. 5.62B); vug (?), de canal associada a fissura (estilólito) (Fig. 5.62C).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a baixa na zona da porosidade de canal.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) precipitação de cimento calcítico (C1 e C2); 2) dissolução dos minerais metastáveis (p.ex: aragonite) e precipitação de cimento (C3); 3) compactação e dissolução associada, formação de estilólitos e porosidade de canal; 4) cimentação sintáxica e poiquilotópica (C4).

Tipo de reservatório: diagenético (ou híbrido 1).

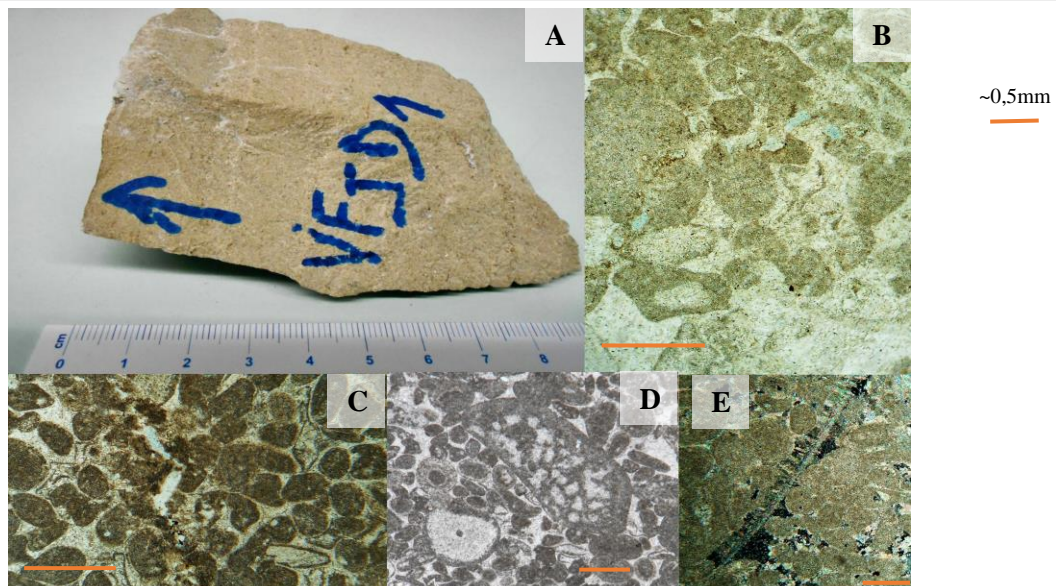


Fig. 5.62. – A) amostra de mão do nível VFJD1; B e C) porosidade interpartícula e de canal associada a estilólitos; D) crinóide e alga calcária presentes na lâmina; E) tipos de cimento.

5.3.15. Amostra VFJD2 (Sector D – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor Bege/esbranquiçada quando seca, e bege quando húmida

Calcário com diferenças granulométricas notáveis (Fig. 5.63A), níveis muito finos (essencialmente pelóidicos) intercalados com níveis mais grosseiros compostos por intraclastos, bioclastos e alguns oóides. Observam-se fragmentos de lamelibrânquios e gastrópodes.

Os níveis mais grosseiros apresentam porosidade alinhada. Na amostra observam-se ainda algumas fracturas preenchidas por calcite.

Classificação composicional: pelintrasparite.

Classificação textural: packstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação segundo Folk: pelbiosparite.

Classificação segundo Dunham: grainstone.

Litofácies: 2.

Bioclastos identificáveis: algas calcárias (Fig. 5.63I), foraminíferos bentónicos.

Outros elementos figurados carbonatados: peloides maioritariamente, alguns oóides e intraclastos.

Notas: estratificação horizontal marcada por diferenças granulométricas (níveis mais finos constituídos por peloides maioritariamente intercalados com níveis mais grosseiros constituídos maioritariamente por bioclastos). Observam-se óxidos de ferro (Fig. 5.63H)

Fases de cimentação (Fig. 5.63 E/F/G): C1- fibroso; C2- laminar; C3- granular hipidiotópico por vezes drúsico; dente de cão; C4 – mosaico; C5 – sintáxico.

Ambiente diagenético: meteórico vadoso, marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, dissolução, dolomitização/desdolomitização (incipiente).

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5 % - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: ~4%.

Tempo de formação da porosidade: deposicional e eodiagéne.

Tipos de Poros (Fig. 5.63 B/C/D): fenestada (maioritariamente), interpartícula e intercrystal.

Classificação qualitativa da permeabilidade: baixa?

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1 e C2); 2) dissolução e geração de porosidade; 3) cimentação granular/drúsica e cimentação em mosaico (C3 e C4); 4) dolomitização seguida de desdolomitização; 5) precipitação de cimento sintáxico (C5).

Tipo de reservatório segundo Ahr (2008): híbrido 1.

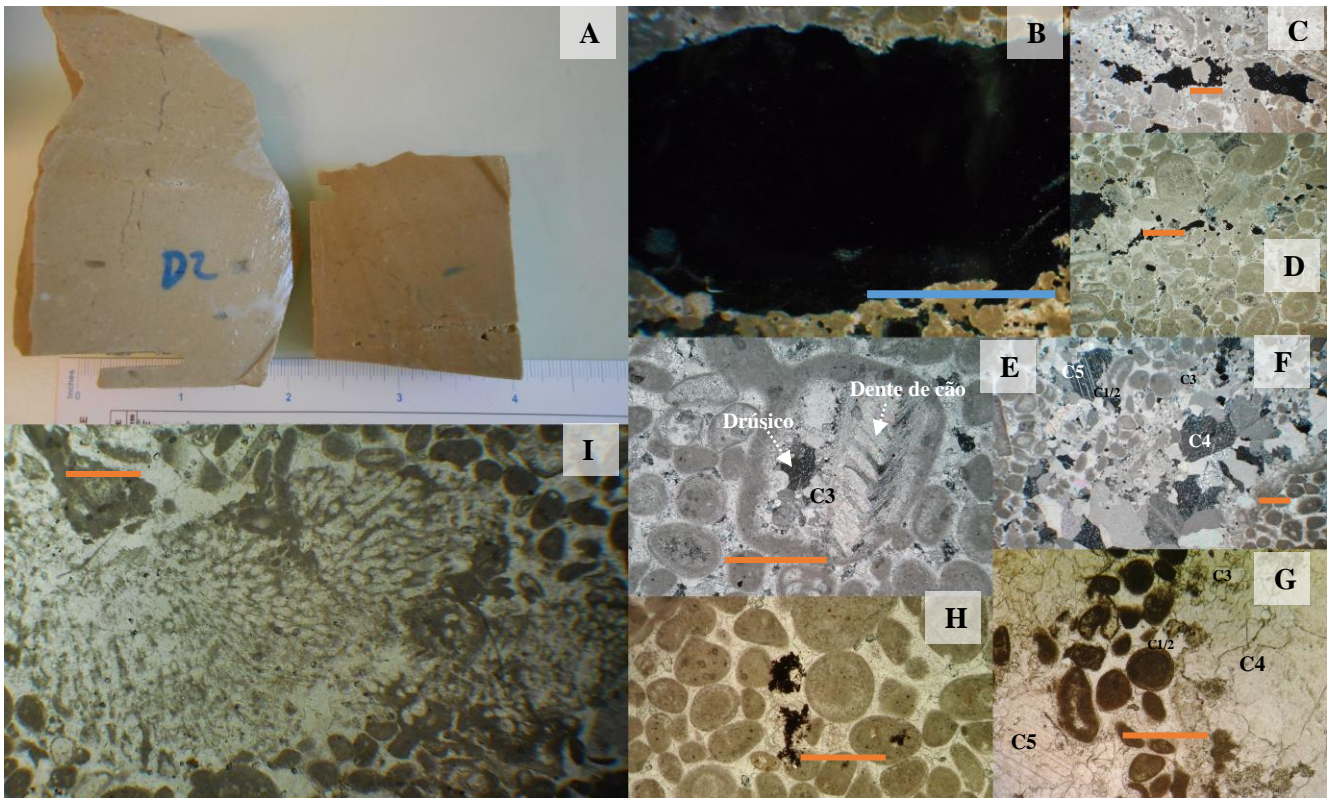


Fig. 5.63. – A) amostra de mão do nível VFJD2; B -D) porosidade fenestrada presente nos nível mais grosseiro (mesosporos); E-G) tipos de cimento presentes; H) óxidos de ferro observáveis; I) alga calcária

5.3.16. Amostra VFJD3 (Sector D – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor bege quando seca, mantendo esta coloração também quando húmida

Calcário oolítico (Fig. 5.64A 1/2) com estratificação oblíqua (?), marcado por pequenas diferenças de granularidade. A amostra contém alguns grãos de tom alarajado dispersos revelando terem sofrido alguma ferruginação. Estão presentes diversos estilólitos com alguma porosidade associada; alguns destes estilólitos sofreram uma dissolução posterior encontrando-se "alargados" e criando uma porosidade de fractura e uma boa permeabilidade.

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oopelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: foraminíferos bentónicos, espículas de equinodermes, fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes (?), estromatoporídeos.

Outros elementos figurados carbonatados: oóides e pelóides maioritariamente, alguns intraclastos.

Notas: estratificação oblíqua marcada por diferença granulométricas- faixas mais grosseiras com mais oóides intercaladas com faixas mais finas com mais pelóides. Na lâmina D3 é observável um estilólito com porosidade de canal associada. Observa-se também oóides com lamelas deslocadas formados por compactação (Fig. 5.64 B/C).

Fases de cimentação: C1-fibroso; C2-laminar; C3- granular xenotópico; C4- granular hipidiotópico drúsico; C5- poiquilotópico e sintáxico (com inclusões de bioclastos).

Ambiente diagenético: marinho vadoso, marinho freático, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, compactação, dissolução.

Classificação qualitativa da porosidade: D3 (A) - baixa (2-5%); D3 - boa (10-15%).

Estimativa da porosidade absoluta: D3 (A) – 4%; D3- 12%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese e telodiagénese.

Tipos de Porosidade: VFJD3 (A): *vug*, moldada (Fig. 5.64D), intercrystalina; VFJD3- *vug*, moldada, de canal (de fissura associada ao estilólito – Fig 5.64 E1-6), interpartícula, intercrystalina, intrapartícula (dentro de oóides).

Classificação qualitativa da permeabilidade: D3 (A) – nula; D3 – alta.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica; 2) compactação e dissolução. Na lâmina D3 formou-se um estilólito por compactação associado a dissolução; 3) dissolução intrapartícula, em pequena quantidade, e posterior cimentação; 4) ampliação por dissolução (D3) do estilólito; 5) precipitação de cimento poiquilotópico e sintáxico.

Tipo de reservatório: D3 (A) -diagenético; D3-diagenético (ou híbrido 2?).

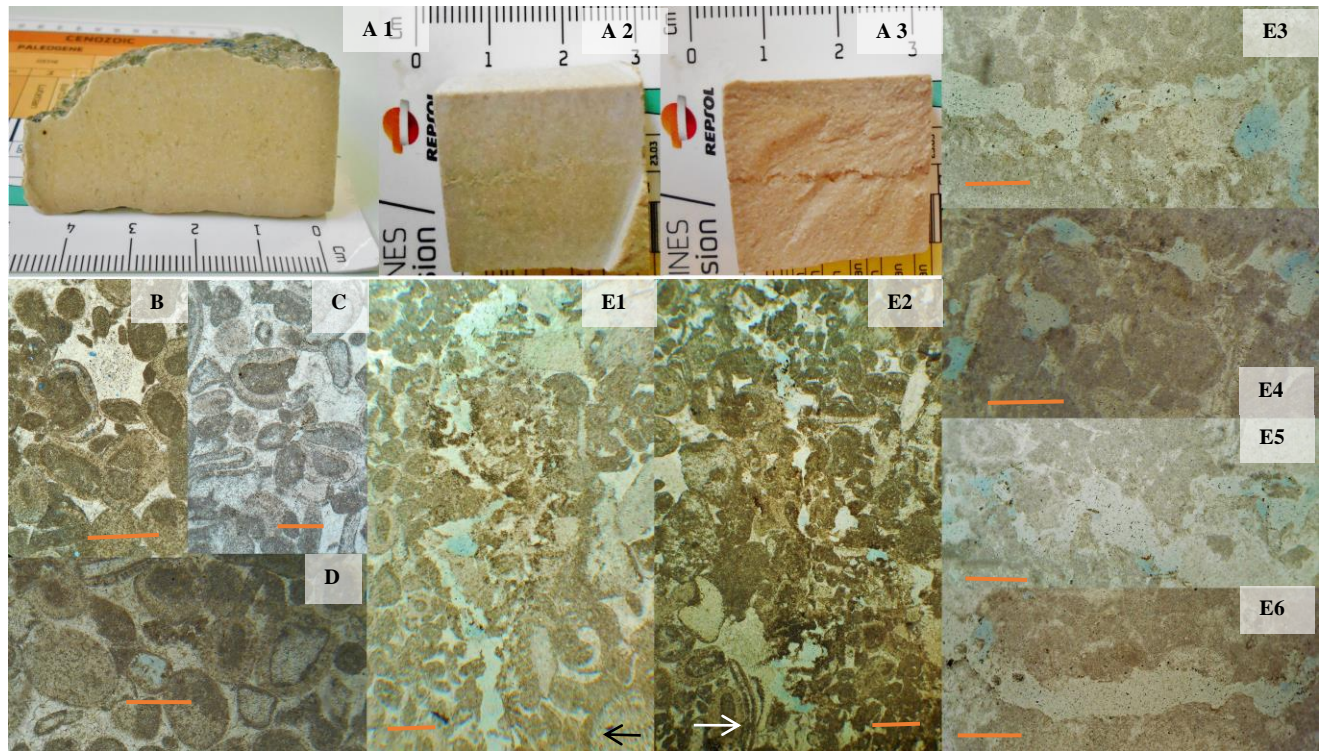


Fig. 5.64. – A) amostra de mão e uma das taliscas do nível VFJD3. Na talisca (A2 e A3) pode-se observar um estilólito que sofreu dissolução, semelhante ao que é observado na lâmina D3; B e C) oóides com lamelas deslocadas, fracturação por compressão; em B pode-se ainda observar porosidade intrapartícula e intercrystal. D) porosidade oomóldica observada em D3 (A). E (1-6) - estilólito ampliado por dissolução observado em D3, aspecto geral (E1-E2) e detalhes do mesmo (E3-E6).

~0,5 mm

5.3.17. Amostra VFJD4 (Sector D – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor bege/esbranquiçada quando seca e bege quando húmida.

Amostra mais fina, com intraclastos e oóides numa matriz essencialmente pelóidica, estão também presentes bioclastos mas em pouca quantidade (Fig. 5.65A).

A amostra apresenta estilólitos com alguns óxidos de ferro associados.

Classificação composicional: pelintrasparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1 ou 2.

Bioclastos identificáveis: gastrópodes, fragmentos de lamelibrânquios, bivalves (Fig. 5.65D) equinodermes, foraminíferos, algas calcárias (Fig. 5.65E).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides maioritariamente, pelóides também muito abundantes, alguns intraclastos.

Notas: óxidos de ferro presentes em abundância (pirite?) a preencher a porosidade dos oóides (Fig. 5.65 B/C). Observam-se litoclastos de packstone oolítico.

Fases de cimentação: C1 – fibroso; C2- laminar; C3-granular xenotópico por vezes drústico; C4- granular hipidiotópico drústico; C5 – poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: meteórico freático, marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: compactação, dissolução, cimentação.

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5%-baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 2%-3%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne.

Tipos de Porosidade: moldada (Fig. 5.65 F), intrapartícula e interpartícula (Fig. 5.65 G-I).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1, C2,); 2) compactação dos grãos e dissolução que leva a formação de porosidade, por vezes preservada (p.ex dentro de alguns oóides) e alguma colmatada (p.ex em lamelibrânquios – C3) 3) alguma dissolução interpartícula depois colmatada por C3 e C4; 4) precipitação de cimento poiquilotópico e sintáxico; 5) dissolução tardia posteriormente preenchida por óxidos de ferro (pirite?).

Tipo de reservatório: híbrido 1.

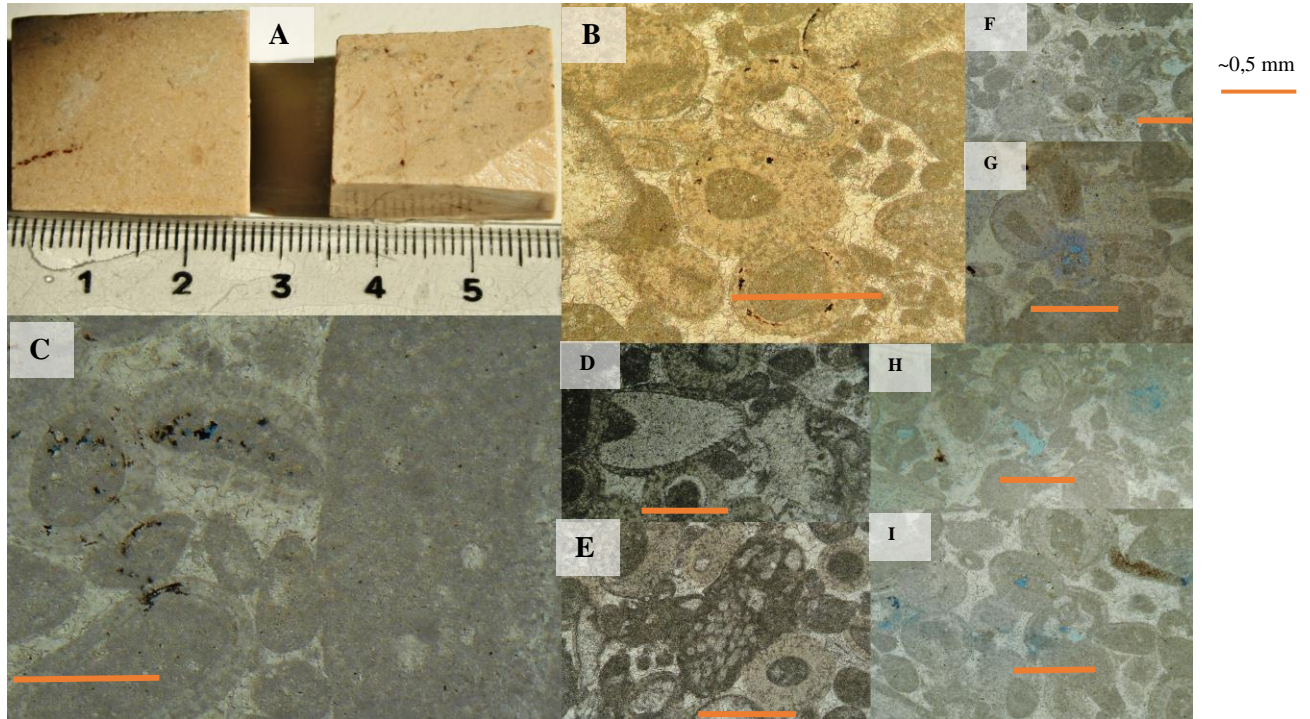


Fig. 5.65. – A) taliscas do nível VFJD4 B e C) óxidos de Ferro (Pirite?) dentro de oóides, em B estes apenas se encontram nos anéis dos oóides e em C encontram-se também no núcleo tendo alguma pequena porosidade associada. D e E) exemplos dos bioclastos presentes, em D observa-se um bivalve e em E observa-se uma alga calcária; F-I) exemplos da porosidade, Em F observa-se porosidade moldada e em F-H observa-se porosidade interpartícula e intrapartícula.

5.3.18. Amostra VFJD5 (Sector D – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor branca quando seca e bege quando húmida.

Calcário oobiolástico (Fig. 5.66A). Corresponde a um nível biostroma, estão presentes vários bioclastos, dos quais se conseguem identificar fragmentos de coraliários, e intraclastos numa matriz oolítica/pelóidica.

A amostra parece estar muito recristalizada.

Classificação composicional: oobiointrasparite.

Classificação textural: framestone? rudstone?

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: biopelintraspárite.

Classificação textural: rudstone?

Litofácies: 3.

Bioclastos identificáveis: espículas de equinodermes, foraminíferos bentónicos, coraliários.

Outros elementos Figurados carbonatados: pelóides e intraclastos abundantes e alguns oóides

Notas: são observáveis “patches” de calcite

Fases de cimentação: C1- laminar circungranular; C2- granular xenotópico; C3- granular/mosaico hipidiotópico drúsico? C4- poiquilotópico;

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, meteórico freático, soterramento

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, recristalização, dolomitização, micritização (?).

Classificação qualitativa da porosidade: 5-10% - moderada

Estimativa da porosidade absoluta: ~8%

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne e telodiagéne (?).

Tipos de Porosidade: *vug* essencialmente (Fig. 5.66 D-F), intrapartícula e móldica (Fig. 5.66 B-C).

Classificação qualitativa da permeabilidade: baixa a moderada

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) alguma compactação e dissolução intrapartícula. Posteriormente alguns destes grãos são preenchidos por cimento (C2) e outros são preservados (p.ex dentro de alguns oóides); 3) dissolução dos coraliários e recristalização da calcite; 4) dolomitização e dissolução posterior da dolomite dando origem a porosidade moldada; 5) precipitação de cimento poiquilotópico e sintático; 6) dissolução tardia e formação de poros *vug*.

Tipo de reservatório: diagenético.

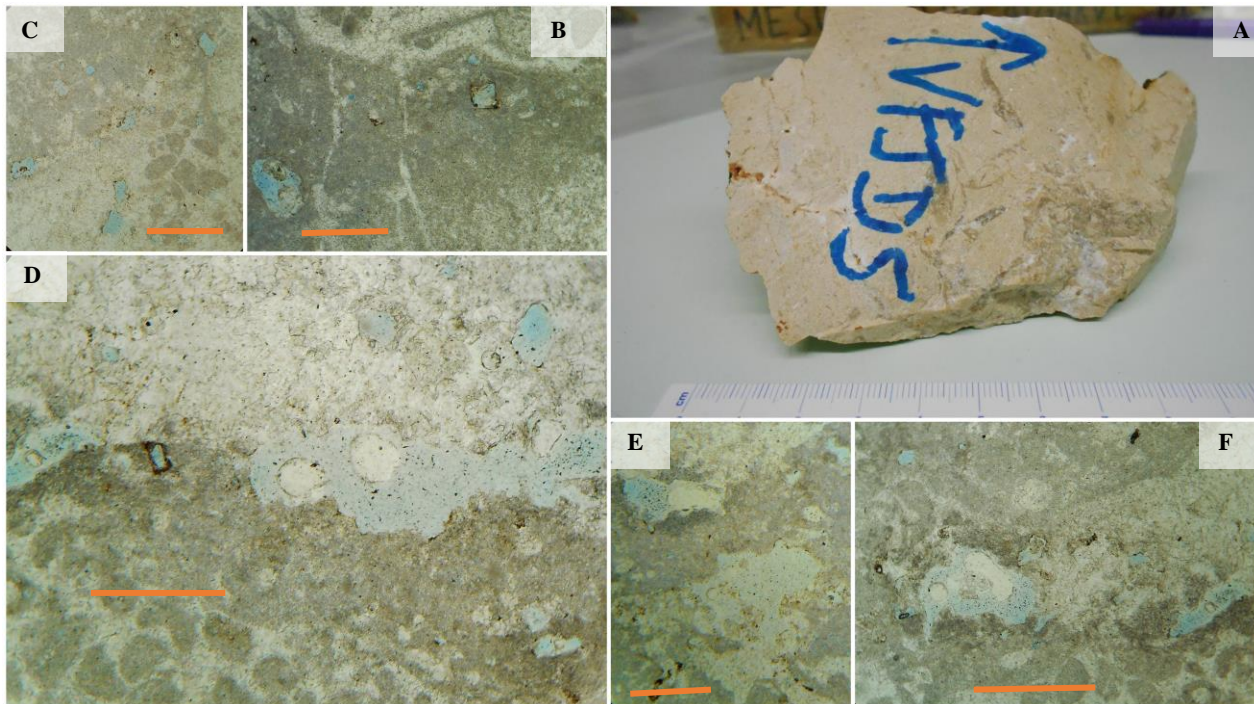


Fig. 5.66 – A) amostra de mão do nível VFJD5; B-F) exemplos da porosidade presente na lâmina, grandemente porosidade tipo *vug* que se formou nos bordos de bioclastos, pode-se também observar porosidade interpartícula e intrapartícula. Em B, C e D, podem-se observar poros de geometria romboédrica que poderão ter tido origem em dissolução de dolomite.

~0,5 mm

5.3.19. Amostra VFJE1 (Sector E – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor branca quando seca mantendo essa coloração quando húmida.

Calcário oolítico mais grosseiro (Fig. 5.67A), com diversos intraclastos e alguns bioclastos presentes contendo algumas partículas alaranjadas (ferruginação?) dispersas.

Classificação composicional: oointrasparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oopelbiosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: foraminíferos, algas calcárias (Fig. 5.67B), fragmentos de equinodermes, fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes, crinóide (?).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides e pelóides em grande abundância, alguns intraclastos

Notas: estilólitos presentes em E (1). Diferenças granulométricas verticais; alguns oóides e pelóides amalgamados e por vezes interpenetrados. A E1 é mais grosseira que a lâmina E1 (A), têm mais litoclastos e menos oóides encontrando-se estes menos compactados.

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- granular xenotópico por vezes drúsico; C4 – granular hipidiotópico; C5- poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho vadoso, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, compactação, dolomitização/desdolomitização.

Classificação qualitativa da porosidade: E1 – 5-10%: moderada; E1 (A) - 5-10%: moderada.

Estimativa da porosidade absoluta: E1-8%; E1 (A) - 10%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese e mesodiagénese.

Tipos de Porosidade: E1- intrapartícula (Fig. 5.67C/E/H)); interpartícula associada ao estilólito (Fig. 5.67 I); E1 (A) – intrapartícula (Fig. 5.67D), moldada (Fig. 5.67 F/G).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a baixa.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação muito acentuada e dissolução associada. Formação de estilólitos e porosidade intrapartícula, alguma da qual foi colmatada por C3/C4; 3) precipitação de cimento poiquilotópico e sintáxico (C5); 4) dissolução mais tardia que origina porosidade moldada. 5) dolomitização/desdolomitização não muito pervasiva e posterior dissolução de alguns desses cristais.

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância de aspectos diagenéticos (ou diagenético).

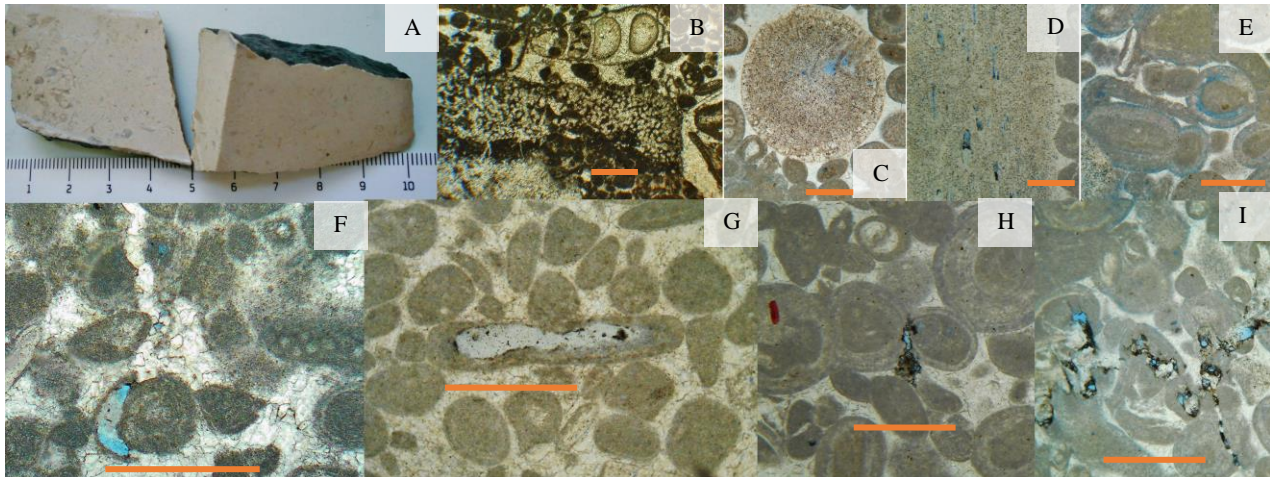


Fig. 5.67. – A) amostras de mão do nível VFJE1; B) alga calcária presente na lâmina VFJE1. C-D) porosidade dentro de equinodermes (intrapartícula); E) porosidade intraoóide; F-G) porosidade moldada. Em F pode-se observar cristais de cimento romboédricos que seriam cristais de dolomite tendo depois sofrido dedolomitização, sendo que alguns desses cristais foram dissolvidos gerando porosidade intercrystal; H) porosidade intrapartícula; I) porosidade interpartícula associada a um estilólito do tipo hummocky.

~0,5 mm

5.3.20. Amostra VFJE1.5 (Sector E – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor branca quando seca e bege quando húmida.

Calcário calciclástico (Fig. 5.68) com intraclastos abundantes de dimensão milimétrica, e com bioclastos também abundantes (lamelibrânquios, coraliários?) numa matriz essencialmente oolítica. Parece ter havido alguma recristalização bem como ferruginização.

Classificação composicional: intraoobiosparite (oointrabiosparite).

Classificação textural: rudstone.

Litofácies: 2.

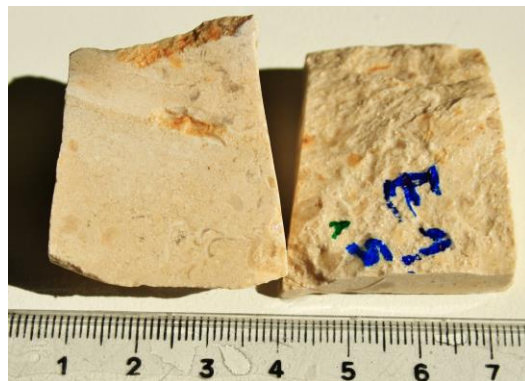


Fig. 5.68 – Amostra de mão do nível VFJE1,5

5.3.21. Amostra VFJE2 (Sector E – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme/esbranquiçada quando seca e creme quando húmida.

Calcário clástico com diversos bioclastos e intraclastos (Fig. 5.69A). Observam-se estilólitos de cor avermelhada com alguma porosidade associada.

Classificação composicional: biooointrasparite.

Classificação textural: bafflestone?

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: biosparite.

Classificação textural: bafflestone (?).

Litofácies:3.

Bioclastos identificáveis: coraliários (Fig. 5.69C), fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes (?).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides, pelóides e intraclastos.

Notas: muito recristalizado; a calcite tem um aspecto quase fibroso. “Patches” de calcite.

Fases de cimentação: C1- laminar circungranular; C2- mosaico xenotópico? C3- granular hipidiotópico drúsico; C4- sintáxico e poiquilotópico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, recristalização, compactação.

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5%- baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: E2 (A) – 3-4%; E2 - 4-5%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne e mesodiagéne.

Tipos de Porosidade: intrapartícula (Fig. 5.69 E/F), interpartícula (Fig. 5.69 D1-2), de canal associada aos estilólitos (Fig. 5.69 B1-3), moldada (Fig. 5.69 F).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a alta (associada à porosidade de canal).

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) precipitação de cimento calcítico (C1), 2) dissolução de minerais metastáveis 3) cimentação (C2 e C3); 4) compactação e dissolução – geração de estilólitos com porosidade interpartícula e de canal associada; 5) precipitação de cimento sintáxico e poiquilotópico (C4)

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância de aspectos diagenéticos (ou diagenético).

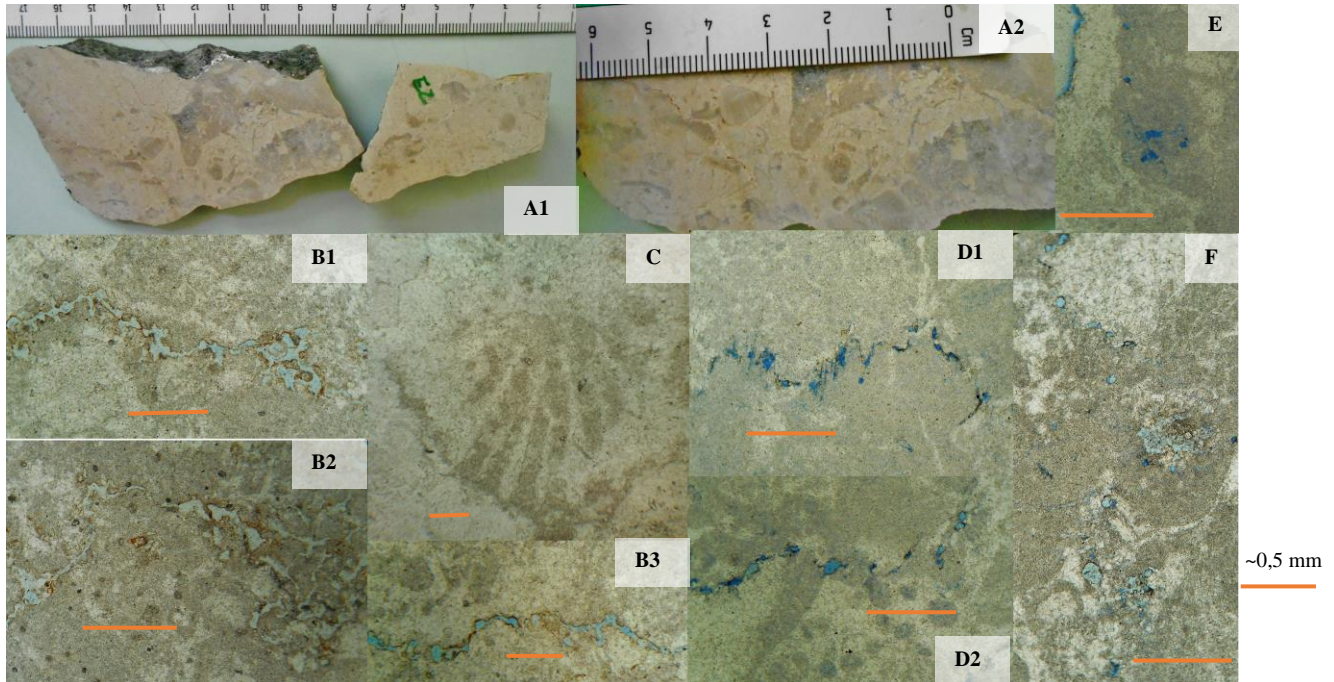


Fig. 5.69. – A1-2) amostra de mão do nível VFJE2; B1-3) estilólitos com porosidade de canal associada (lâmina E2); C) coraliário presente na lâmina E2; D1-2) estilólitos com porosidade interpartícula associada (lâmina E2(A)); E) Porosidade intrapartícula (lâmina E2 (A)); F) Porosidade intrapartícula, interpartícula e moldada (lâmina E2).

5.3.22. Amostra VFJE2.5 (Sector E – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca, mantendo essa coloração quando está humedecida.

Calcário calciclástico (Fig. 5.70) com diversos intraclastos, alguns grosseiros, e com diversos bioclastos (identificam-se gastrópodes e fragmentos de lamelibrânquios), com bastantes oóides também. Estão presentes vários estilólitos com ferruginização associada (cor alaranjada).

Classificação composicional: Intraobiosparite (ou oointrabiosparite).

Classificação textural: rudstone? grainstone?

Litofácies: 1 ou 2.

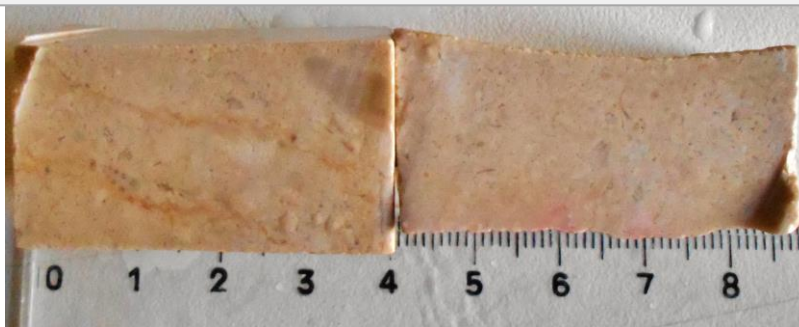


Fig. 5.70 – Amostra de mão do nível VFJE2,5

5.3.23. Amostra VFJE3 (Sector E – Poço CDE)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor branca quando seca e creme quando húmida

Calcário oolítico com diversos bioclastos (algas calcárias, equinodermes), e diversos pelóides.

Observam-se veios de calcite e estilólitos com porosidade associada.

Classificação composicional: oolítico-sparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: intrapelsparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: algas calcárias (Fig. 5.71 C1-2), gastrópodes, foraminíferos, estromatoporídeos (?).

Outros elementos Figurados carbonatados: maioritariamente intraclastos e pelóides, alguns oóides.

Fases de cimentação (Fig. 5.71 E1-3): C1- laminar C2- granular xenotópico; C3- drúsico; C5 – poquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, micritização (Fig. 5.71D).

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5%- baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 3%.

Tempo de formação da porosidade: deposicional e eodiagénese.

Tipos de Porosidade : Intrapartícula, *vug*, interpartícula (Fig. 5.71 B) e intercristal.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1/2); 2) dissolução associada; criação de porosidade intrapartícula alguma depois colmatada (C3); 3) Precipitação de cimento poquilotópico e sintáxico (C4); 4) dissolução tardia e formação de porosidade *vug*.

Tipo de reservatório: híbrido 1.

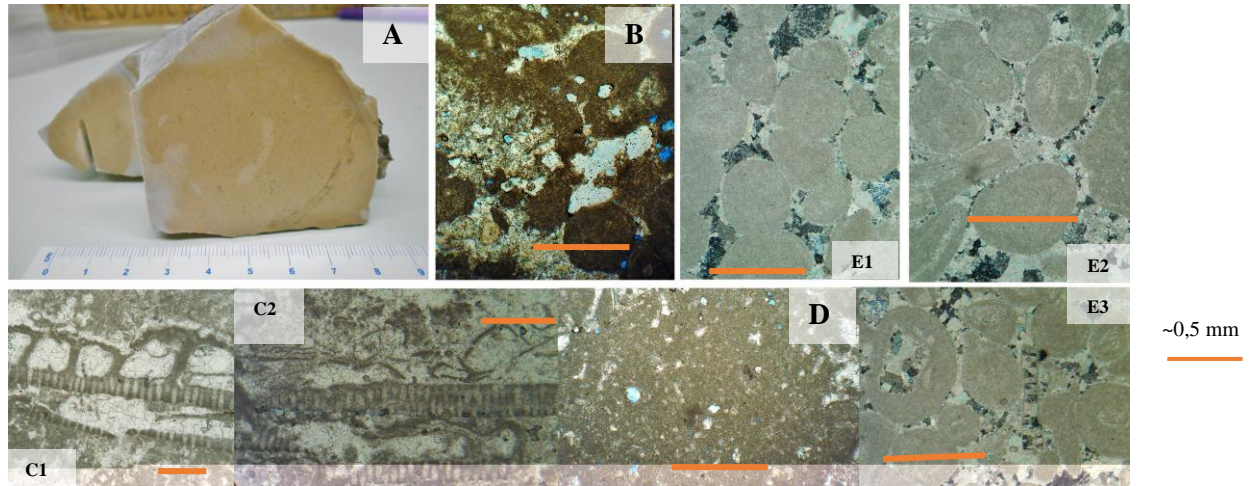


Fig. 5.71 – A1-2) amostra de mão do nível VFJE3; B) porosidade intrapartícula, interpartícula e *vug*; C1-2) alga calcária, em C2 pode-se observar porosidade dentro da alga calcária (intrapartícula) D) oóides muito micritizados, com porosidade associada; E1-3) alguns dos tipos de cimentos presentes na lâmina.

5.3.24. Amostra VFJF1 (Sector F – Poço FG)

Descrição Mesoscala: amostra de cor creme quando seca mantendo essa coloração quando húmida.

Calcário essencialmente oolítico (Fig. 5.72), com alguns intraclastos e bioclastos de pequena dimensão. É possível observar diversos estilólitos de pequena dimensão alaranjados (ferruginização). Pode-se também observar algumas fracturas preenchidas por calcite.

Classificação composicional: oosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.



Fig. 5.72 – Amostra de mão do nível VFJF1

5.3.25. Amostra VFJF1.5 (Sector F – Poço FG2)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quando seca, mantendo essa coloração quando é humedecida.

Calcário mais intraclástico com uma matriz oolítica (Fig. 5.73A), mais grosseiro do que as amostras de F1 (equivalente lateral). Esta camada torna-se mais grosseira para SE, mantendo no entanto valores semelhantes de porosidade. Há também diferenças granulométricas verticais, a amostra F1,5 recolhida mais próxima do nível F2, é mais grosseira que a F1,5 (A) que é mais oolítica.

Observa-se porosidade, e são também observáveis alguns bioclastos.

Classificação composicional: oointrasparite/intraoosparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiointrasparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: equinodermes, foraminíferos bentónicos, serpulídeos (Fig. 5.73 G), gastrópodes, algas calcárias.

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides e intraclastos abundantes.

Notas: algumas partículas encontram-se ferruginizadas (Fig. 5.73 B), observam-se agregados de grãos e partículas interpenetradas.

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- drúsico; C3 -granular hipidiotópico/xenotópico; C4- sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação; dissolução; compactação.

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5% - baixa .

Estimativa da porosidade absoluta: ~5%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne - mesodiagéne?

Tipos de Porosidade: intrapartícula (Fig. 5.73 C-F), interpartícula e intercristal

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação acentuada e dissolução; 3) cimentação drúsica (C2) e granular (C3); 4) micritização e geração de alguma porosidade intrapartícula; 5) precipitação de cimento sintáxico (C4); 6) dissolução tardia e ferruginação de algumas partículas/ precipitação de óxidos de ferro.

Tipo de reservatório: diagenético.

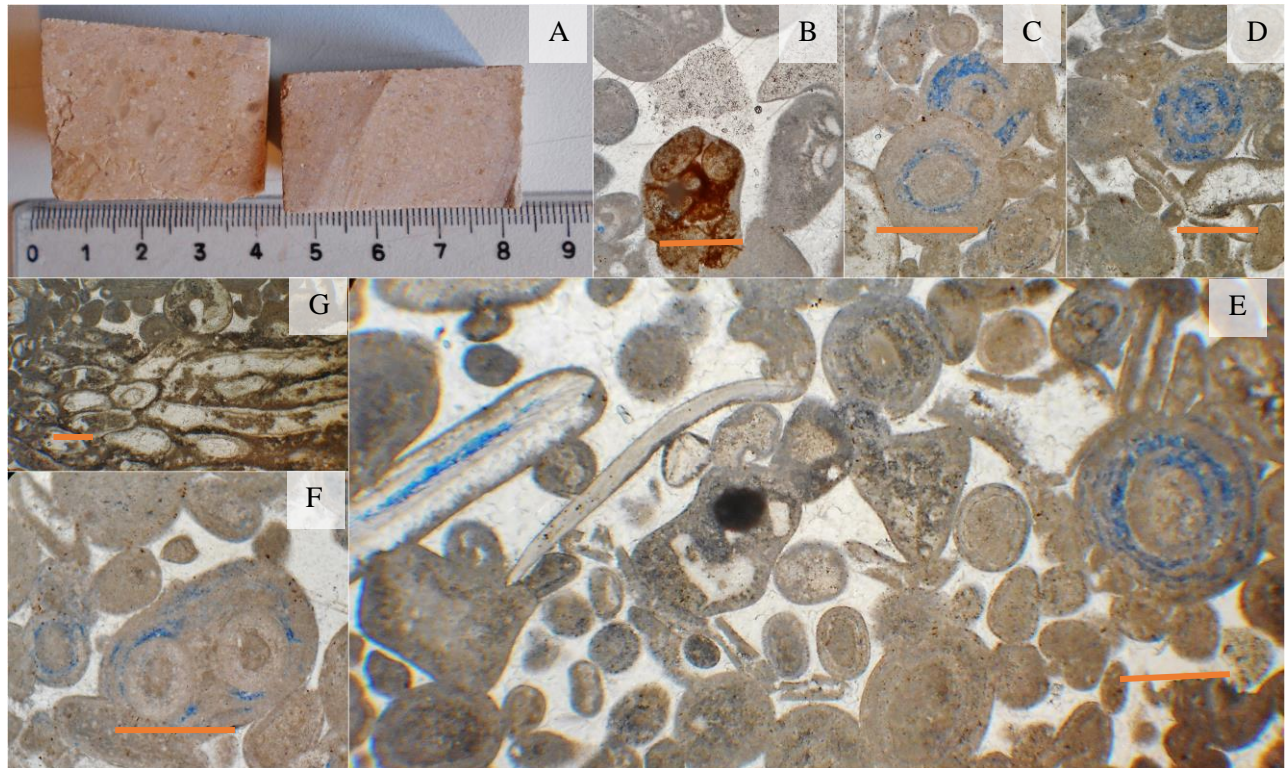


Fig. 5.73 – A) amostra de mão do nível VFJF1,5; B) agregado com partículas ferruginizadas; C-F) porosidade intrapartícula. Pode-se também observar (em especial em E), partículas com inclusões de óxidos de ferro; G) serpulídeos ~0,5 mm

5.3.26. Amostra VFJF2/F2 (A) (Sector F – Poço FG)

Descrição Mesoscala: amostra de cor creme quando seca, mantendo essa coloração quando humedecida.

Calcário com diversos bioclastos (Fig. 5.74A), dos quais se identificam fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes e coraliários. A amostra apresenta uma matriz fina, oolítica/pelódica. Pode-se observar alguma ferruginação e fracturas que foram preenchidas por calcite.

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: F2- oobiosparite; F2 (A) – oosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1?

Bioclastos identificáveis: equinodermes, fragmentos de lamelibrânquios, serpulídeos (?).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides, escassos intraclastos.

Fases de cimentação: F2- C1- laminar; C2) granular hipidiotópico/idiotópico; C3- sintáxico (muito pequena quantidade)

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, dissolução, compactação, dolomitização/desdolomitização.

Classificação qualitativa da porosidade: F2: 5-10% - moderada; F2 (A): 2-5% - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: F2 – 6-7%; F2 (A) – 3-4%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese-mesodiagénese.

Tipos de Porosidade: intrapartícula (Fig. 5.74 B1-B7), interpartícula (Fig. 5.74 B3) e intercrystal (Fig. 5.74 B5-B7).

Classificação qualitativa da permeabilidade: F2 – nula a baixa; F2 (A) – nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação muito acentuada e dissolução; 3) cimentação granular (C2) 4) dolomitização e posterior desdolomitização, com geração de porosidade intercrystal; 5) precipitação de cimento sintáxico (C3).

Tipo de reservatório: diagenético.

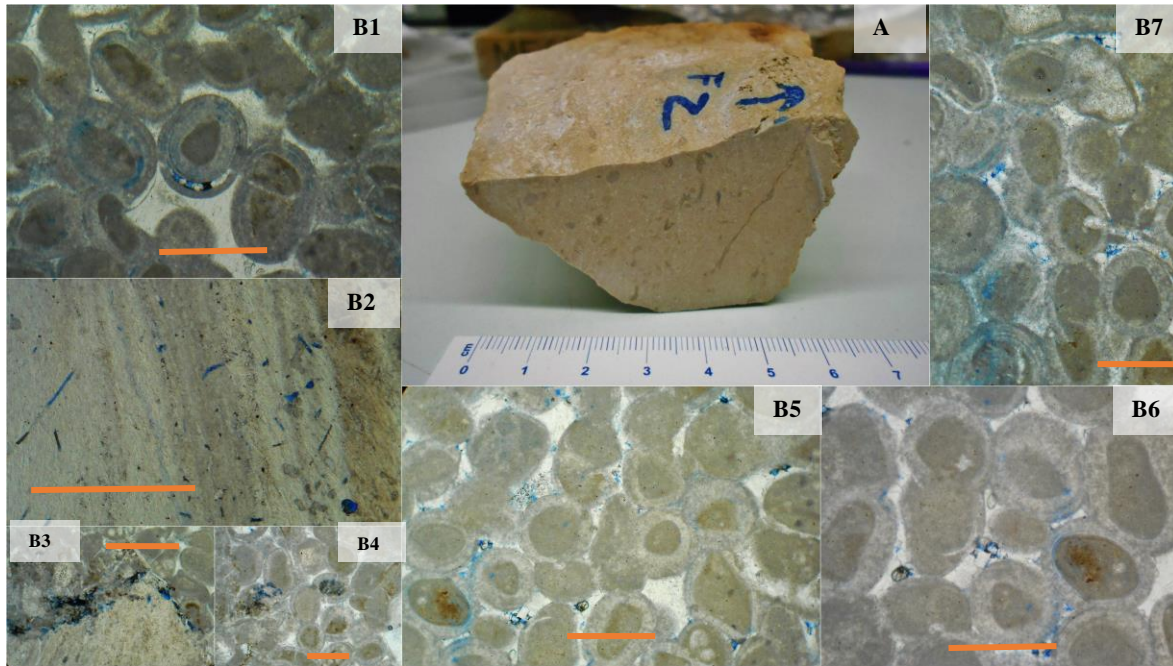


Fig. 5.74. – A1-2) amostra de mão do nível VFJF2; B1-7) exemplos da porosidade presente. Em B1 observa-se porosidade intrapartícula, um dos oóides tem uma lamela deslocada e porosidade (intrapartícula) associada a essa fractura. Em B2 observa-se porosidade intrapartícula dentro de um lamelibrânquio e em B3 porosidade interpartícula entre esse lamelibrânquios e outros grãos. Em B4 observa-se porosidade intra e interoóides. De B5-7 observa-se porosidade intraoóide e intercrystal. É também possível observar alguns cristais romboédricos que se pensa terem sido cristais de dolomite que sofreram depois desdolomitização. ~0,5 mm

5.3.27. Amostra VFJF2.5 (Sector F – Poço FG2)

Descrição Mesoscala: amostra de cor creme/esbranquiçada quando seca e creme quando humedecida.

Varição lateral do nível VFJF2, retirada junto ao bordo com F1,5. Calcário essencialmente oolítico com alguns bioclastos (identificam-se fragmentos de lamelibrânquios) e alguns intraclastos (Fig. 5.75A). Observa-se alguma porosidade (microporosidade).

Classificação composicional: oointrasparite (oointrabiosparite).

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 2?

Bioclastos identificáveis: crinóides, espículas de equinodermes, foraminíferos bentônicos, serpulídeos (?), algas calcárias, coraliários (Fig. 5.75 F/G).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides e pelóides predominantemente; alguns intraclastos;

Notas: Diferenças de granulometria vertical. Calcite sintática dentro de equinodermes. Oóides interpenetrados (muita compactação) e estilólitos presentes. Óxidos de ferro presentes dentro dos anéis dos oóides.

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- granular xenotópico; C3- granular hipidiotópico; C4 – poiquilotópico e sintático.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, compactação, dissolução, micritização, dolomitização.

Classificação qualitativa da porosidade: 5-10% - moderada.

Estimativa da porosidade absoluta: 8%.

Tempo de formação da porosidade: mesodiagenese.

Tipos de Porosidade: intrapartícula (Fig. 5.75 B-E), intercrystal e moldada (Fig. 5.75 E).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a baixa.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação e alguma dissolução; 3) cimentação granular (C2-C3); 4) micritização e geração de porosidade intrapartícula; 4) dolomitização; 5) desdolomitização por vezes gerando porosidade intercrystal; 6) cimentação sintática e poiquilotópica.

Tipo de reservatório: diagenético.

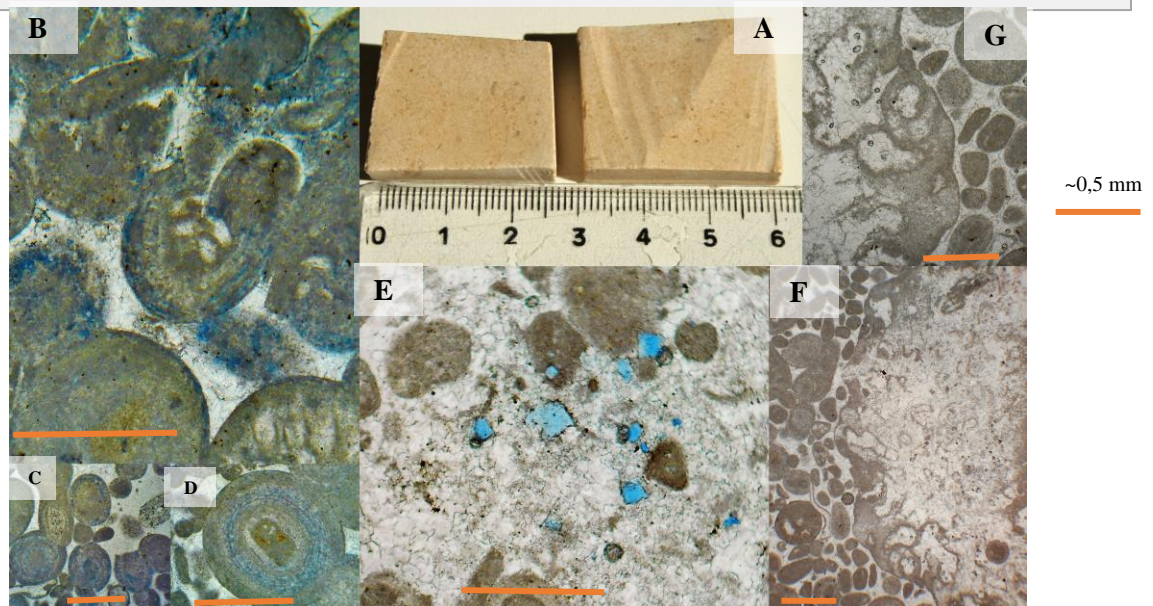


Fig. 5.75. – A) taliscas do nível VFJF2,5; B-D) porosidade intrapartícula (intraoóides), tipo de porosidade em maior abundância na lâmina; E) porosidade intrapartícula, intercrystal e moldada – poros de geometria romboédrica, provavelmente resultantes de dissolução de dolomite; F-G) pormenor de um bioclasto (Coral) presente em F2,5

5.3.28. Amostra VFJF2.75 (Sector F – Poço F3)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme quer quando está seca quer quando está húmida.

Calcário oolítico (Fig. 5.76A), com alguns intraclastos e pelóides. Não se consegue observar nenhuma estratificação, sendo este nível um pouco menos grosseiro que o nível F2,5.

Calcário com pequenos estilólitos e microporosidade observável.

Classificação composicional: oosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oosparite.

Classificação textural: grainstone.

Litofácies: 1.

Bioclastos identificáveis: equinodermes, moluscos (?), foraminíferos bentónicos.

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides (abundantes), pelóides e intraclastos (em pequena quantidade).

Notas: observam-se agrupados de grãos e estilólitos com porosidade associada.

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- drúsico; C3 -granular hipidiotópico; C4- sintáxico.

Ambiente diagenético: marinho pouco profundo, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, dissolução, compactação, micritização (dentro dos oóides), dolomitização/desdolomitização (Fig. 5.76 B).

Classificação qualitativa da porosidade: 5-10% - moderada.

Estimativa da porosidade absoluta: ~6-7%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéneze - mesodiagéneze.

Tipos de Porosidade: intrapartícula (fig. 5.76 B), intercristal e de canal (Fig. 5.76 C-E).

Classificação qualitativa da permeabilidade: baixa a alta (nas zonas dos estilólitos).

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação acentuada e dissolução; 3) cimentação drúsica (C2) e granular (C3); 4) micritização e geração de alguma porosidade intrapartícula; 5) precipitação de cimento sintáxico (C4); 5) compactação e dissolução tardia com geração de estilólitos com porosidade de canal

Tipo de reservatório: diagenético.

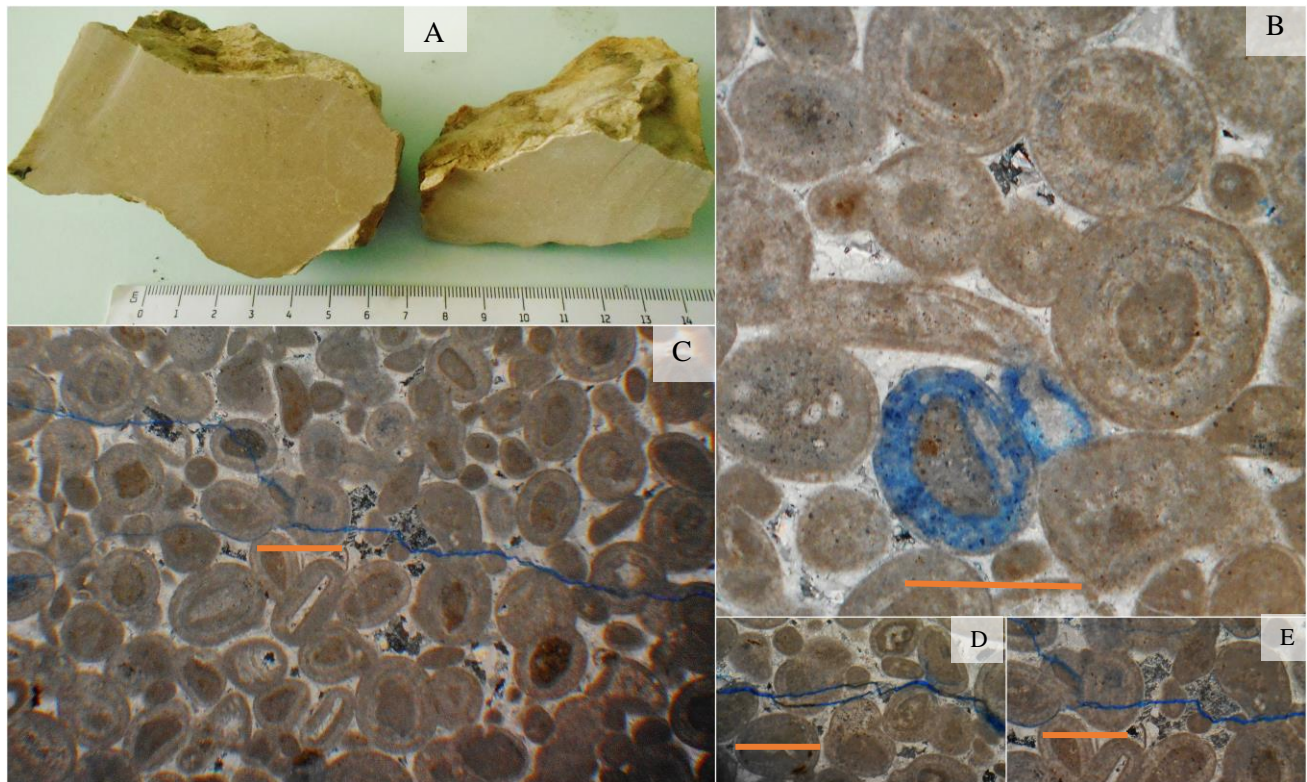


Fig. 5.76 – A) amostra de mão do nível VFJF2,75; B) porosidade intrapartícula (intraoóide); pode-se também observar um romboedro de dolomite que sofreu desdolomitização; C-E) estilólito com porosidade de canal associada ~0,5 mm

5.3.29. Amostra VFJF3/F3.5 (Sector F – Poço F3)

Descrição Mesoscala: Amostra de cor creme/esbranquiçada quando seca, e creme quando húmida.

A amostra F3 e F3,5 (Fig. 5. 77 A1 e A2, respectivamente) possuem diversos bioclastos sendo possível identificar diversos fragmentos de lamelibrânquios, algas calcárias, e em F3,5 coraliários. Ambas as amostras têm também diversos intraclastos alguns dos quais tem tom alaranjado (ferruginação).

Classificação composicional: oointrabiosparite (F3); biooointrasparite (F3,5).

Classificação textural: rudstone.

Litofácies: F3-2/3; F3,5 – 3.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: biointrasparite.

Classificação textural: rudstone.

Litofácies: 2/3?

Bioclastos identificáveis: fragmentos de lamelibrânquios, gastrópodes, foraminíferos bentônicos, estromatoporídeos (?), algas calcárias (Fig. 5.77B), espículas de equinodermes, coraliários (Fig. 5.77C).

Outros elementos Figurados carbonatados: intraclastos na maioria, alguns oóides e pelóides.

Notas: lâmina com clastos muito grosseiros.

Fases de cimentação (Fig. 5.77 H/I): C1-Laminar; C2-granular xenotípico, por vezes drúsico; C3- mosaico hipidiotópico/xenotípico, por vezes drúsico; C4- poiquilotópico e sintáxico.

Ambiente diagenético: meteórico freático, marinho freático, soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, recristalização.

Classificação qualitativa da porosidade: 2- 5%-baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: ~3-4%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagénese.

Tipos de Porosidade: Intrapartícula (Fig. 5.77 D-G), moldada, intercristal.

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: cimentação calcítica (C1); 2) dissolução e formação de porosidade intrapartícula, interpartícula e moldada, posteriormente, a maior parte dessa porosidade é preenchida por calcite (C2/3) sofrendo por vezes recristalização; 3) micritização e geração de alguma porosidade intrapartícula; 4) precipitação de cimento sintáxico e poiquilotópico (C4); 5) dissolução tardia e formação de porosidade móldica.

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância de aspectos diagenéticos.

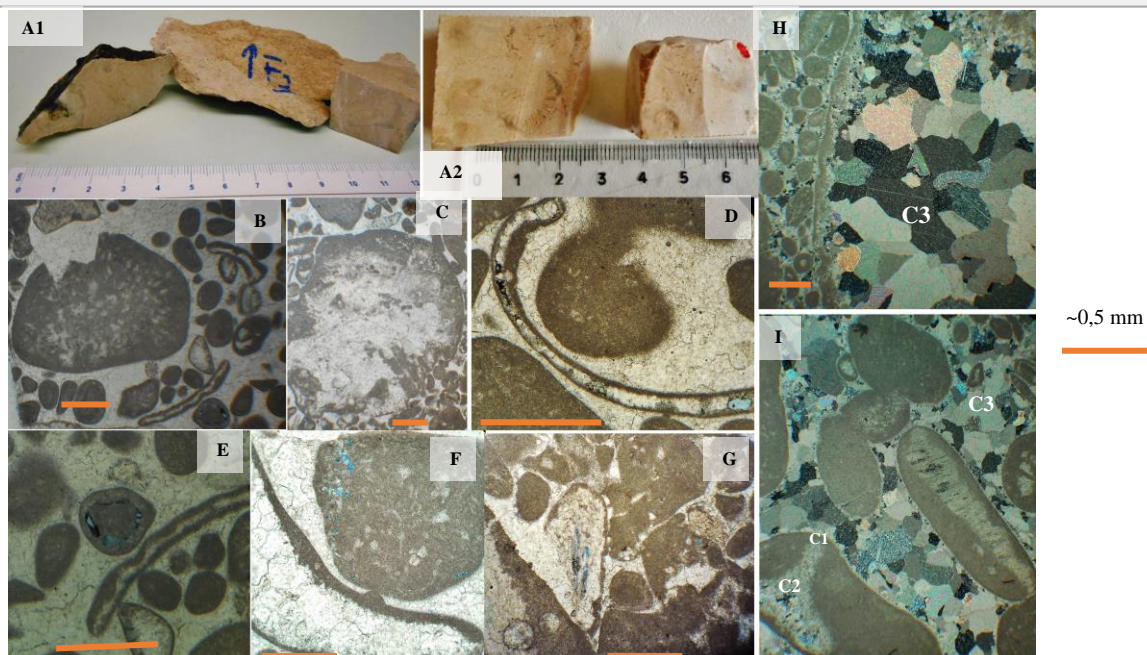


Fig. 5.77. – A1-2) amostras de mão e taliscas do nível VFJF3; B-C) exemplos de bioclastos presentes na lâmina - (B) alga calcária; (C) coraliário (?), que sofreu recristalização acentuada; D-G) exemplos de porosidade intrapartícula; H-I) exemplo de algumas das fases de cimentação presentes.

5.3.30. Amostra VFJG1/G1.5 (Sector G – Poço FG/FG2)

Descrição Mesoscala: Amostra creme esbranquiçada quando seca e creme quando humedecida.

Ambas as amostras são calcários oolíticos (Fig. 5.78 A1/2), mas amostra G1 é mais grosseira apresentando diversos bioclastos (alguns de dimensão centimétrica) que incluem fragmentos de algas calcárias e coraliários? pode-se também observar pequenos estilólitos coincidentes com a estratificação.

Em ambas as amostras observa-se estratificação paralela marcada por diferenças granulométricas entre níveis mais oolíticos e níveis mais intraclásticos.

Classificação composicional: oointrasparite.

Classificação textural: grainstone.

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: peloobiosparite

Classificação textural: grainstone? rudstone?

Litofácies: 1

Bioclastos identificáveis: equinodermes, algas calcárias, crinóide (?), coraliário (Fig. 5.78 C), fragmentos de lamelibrânquios, foraminíferos.

Outros elementos Figurados carbonatados: predominantemente pelóides, alguns oóides e alguns intraclastos

Notas: rocha recristalizada; calcite sintática e patches de calcite.

Fases de cimentação: C1- laminar; C2- drúsico ; C3- granular/mosaico xenotópico (Fig. 5.78 B2); C4 – poquilotópico e sintático (Fig. 5.78 B1).

Ambiente diagenético: marinho freático?

Processos diagenéticos identificáveis: dissolução, cimentação, recristalização.

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5%- baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: 4-5%.

Tempo de formação da porosidade: eodiagéne.

Tipos de Poros: intrapartícula (Fig. 5.78 D1-4), moldada (Fig. 5.78 D3), interpartícula (em pequena quantidade), intercrystal (Fig. 5.78 D3).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula a baixa.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: cimentação calcítica (C1); 2) recristalização de alguma calcite; 3) dissolução. 4) alguns dos poros intrapartícula são colmatados por cimento (C2/3); 5) precipitação de cimento poquilotópico e sintático (C4); 6) dissolução tardia e criação de porosidade moldada.

Tipo de reservatório: híbrido 1, com predominância de aspectos diagenético.

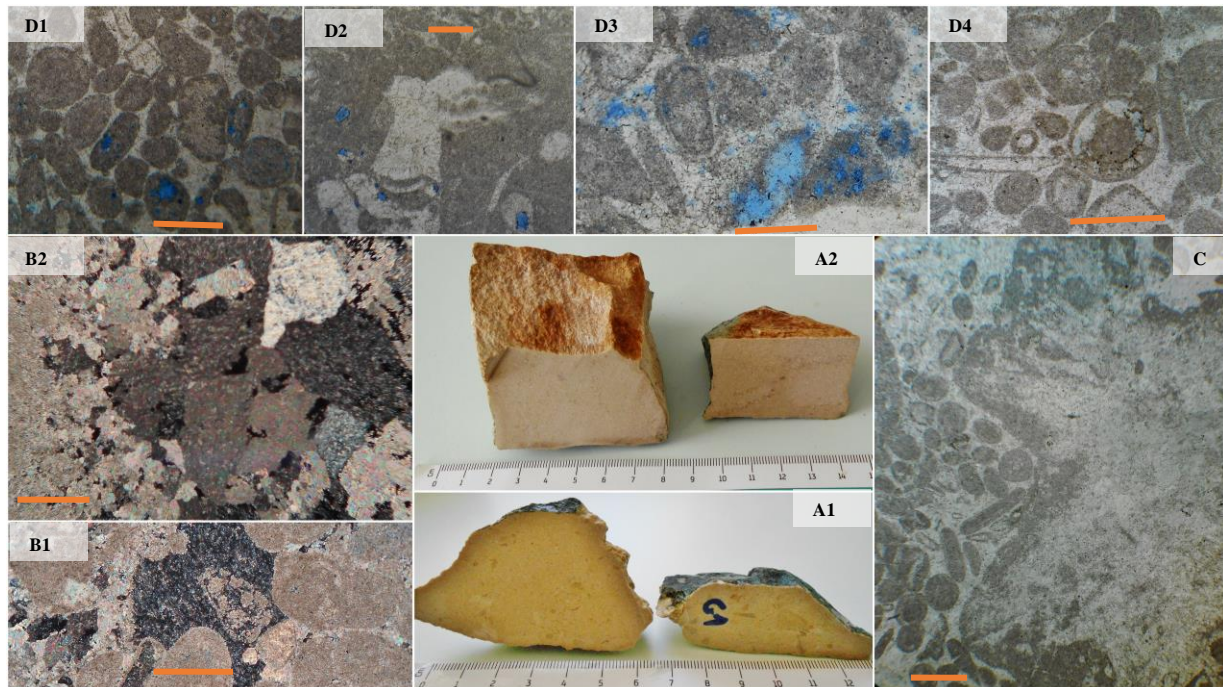


Fig. 5.78. – A1-2) amostras de mão dos níveis G1 (A1) e G1,5 (A2); B1-2) alguns tipos de cimentação presentes na lâmina G1; C) exemplo de um bioclasto presente na lâmina (coraliário?); D1-4) exemplos de porosidade presentes na lâmina. Porosidade essencialmente intrapartícula, mas em D3 pode-se observar também porosidade moldada, interpartícula e intercristal.

~0,5 mm

5.3.31. Amostra VFJG2/G2.5 (Sector G – Poço FG e FG2)

Descrição Mesoscala: amostras de cor creme quando secas, mantendo essa coloração quando humedecidas.

A amostra G2 (Fig. 5.79 A1) corresponde a um calcário com uma grande componente bioclástica, incluindo fragmentos de lamelibrânquios e coraliários(?). Tem diversos intraclastos presentes e agregados de vários grãos. A matriz parece ser oolítica/pelódica. É também possível observar alguma calcite recristalizada.

A amostra G2,5 (Fig. 5.79 A2), está no mesmo nível que G1 (variação lateral deste) é uma amostra bastante mais oolítica, não apresentando tantos bioclastos. Os bioclastos presentes são também de menor dimensão. Esta amostra deverá corresponder mais à matriz que rodeia os corpos bioedificados dentro do nível biostroma.

Classificação composicional: oobiointrasparite.

Classificação textural: rudstone (G2); grainstone/packstone (G2,5)

Descrição Petrográfica:

Classificação composicional: oobiosparite.

Classificação textural: rudstone?

Litofácies: 2 ou 3?

Bioclastos identificáveis: algas calcárias, gastrópodes, foraminíferos bentônicos, coraliário (?), serpulídeos (Fig. 5.79 B), equinodermes (Fig. 5.79 C).

Outros elementos Figurados carbonatados: oóides maioritariamente, intraclastos também abundantes.

Notas: agregados de packstone presentes.

Fases de cimentação (Fig. 5.79 G/H): C1- laminar; C2- granular hipidiotópico por vezes drúsico; C3- granular xenotópico; C4- Sintáxico e poi quilotópico.

Ambiente diagenético: marinho freático, meteórico freático e soterramento.

Processos diagenéticos identificáveis: cimentação, dissolução, compactação, dolomitização?

Classificação qualitativa da porosidade: 2-5% - baixa.

Estimativa da porosidade absoluta: ~2%

Tempo de formação da porosidade: deposicional e eodiagéne.

Tipos de Porosidade: interpartícula (Fig. 5.79 D), intercrystal, móldica (Fig. 5.79 E), intrapartícula (Fig. 5.79 F).

Classificação qualitativa da permeabilidade: nula.

Interpretação da evolução diagenética da rocha: 1) cimentação calcítica (C1); 2) compactação e dissolução; 3) cimentação drúsica e granular (C3-4) colmatando diversos poros; 4) compactação e dissolução com geração de estilólitos com porosidade interpartícula associada; 5) dolomitização e posterior dissolução formando porosidade intercrystal e móldica 6) Dissolução de alguns equinodermes e cimentação sintáxica (com inclusões) e poi quilotópica

Tipo de reservatório: híbrido 1 com predominância de aspectos diagenéticos

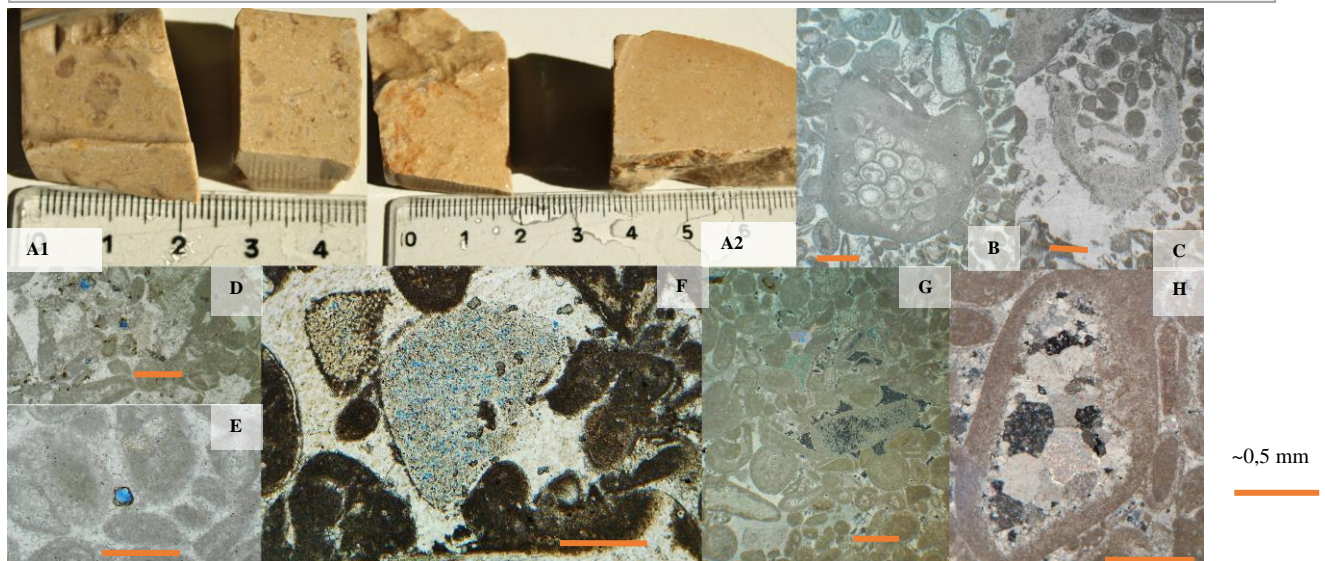


Fig. 5.79. – A1-2 amostras de mão dos níveis G2 (A1) e G2,5 (A2). B e C) bioclastos presentes na lâminas. Em B serpulídeos, e em C equinoderme? D-F) exemplos de porosidade observada. Em D observa-se porosidade interpartícula associada a um pequeno estilólito, em E observa-se porosidade de forma romboédrica (antigo cristal de dolomite? – porosidade móldica) e em F observa-se porosidade primária dentro de equinodermes; G e H) exemplos de cimentos. Em G observa-se cimento sintáxico com inclusões de equinodermes e em H cimento drúsico dentro de um clasto e granular entre os grãos.

5.4. Resultados dos ensaios de porosidade pelo método da saturação em água

Referência (Litofácies)	Peso fio de Nylon (FN) /Rede	Ws	Wsat	Wsub	Vpe	Vfe	Φ (%)	Porosidade segundo Inês <i>et al.</i> (2012)	Φ (%) Média	Φ (%) Total Estimada em Lâmina delgada
VFJ1 (L1a)	0,0146	11,89	12,18	7,47	0,28	4,71	6,04	Moderada	4,63	3%
VFJ1(A) (L1a)	0,013	14,97	15,15	9,42	0,18	5,73	3,23	Baixa		
VFJ2 (L1a)	0,017	8,01	8,07	5,04	0,06	3,03	1,97	Nula	1,97	-
VFJ2(A) (L1a)	0,0186	10,37	10,45	6,52	0,08	3,93	1,96	Nula		
VFJ3 (L3)	0,017	19,07	19,34	12,00	0,27	7,34	3,72	Baixa	3,13	3%
VFJ3(A) (L3)	0,0184	30,37	30,66	19,09	0,30	11,58	2,55	Baixa		
VFJ4 (L2)	0,0154	21,09	21,35	13,30	0,26	8,05	3,21	Baixa	4,18	2% *
VFJ4(A)	0,0176	16,29	16,62	10,27	0,33	6,36	5,15	Moderada		
VFJ5 (L3)	0,0149	13,31	13,37	8,40	0,05	4,97	1,10	Nula	1,34	0,5%
VFJ5(A) (L3)	0,0157	8,96	9,02	5,65	0,05	3,36	1,57	Nula		
VFJ6 (L2)	0,0175	12,87	12,95	8,10	0,08	4,85	1,58	Nula	1,96	-
VFJ6(A) (L2)	0,0155	14,71	14,84	9,26	0,13	5,58	2,33	Baixa		
VFJ7 (L3)	1,3959	38,69	23,20	38,92	0,23	15,73	1,47	Nula	1,55	-
VFJ7(A) (L3)	0,6155	28,23	17,15	28,42	0,18	11,26	1,62	Nula		
B1 (L3)	0,0169	20,02	20,19	12,63	0,18	7,56	2,32	Baixa	1,85	1%
B1(A) (L3)	0,0120	14,80	9,34	14,88	0,08	5,54	1,38	Nula		
B1,5 (L1a)	0,6155	23,53	14,23	23,84	0,31	9,62	3,23	Baixa	3,15	3%
B1,5(A) (L1a)	0,6155	25,74	15,61	26,06	0,32	10,44	3,07	Baixa		
B2 (L3)	0,0166	18,10	18,26	11,42	0,17	6,85	2,42	Baixa	2,66	-
B2(A) (L3)	0,0188	13,92	14,07	8,77	0,15	5,30	2,90	Baixa		
B2,5 (L3)	0,6155	17,53	10,44	17,61	0,09	7,18	1,19	Nula	1,19	-
B2,5(A) (L3)	0,6155	23,80	14,38	23,91	0,11	9,53	1,19	Nula		
B3 (L1a)	0,0188	17,97	18,03	11,32	0,06	6,71	0,89	Nula	0,86	0,5-1%
B3(A) (L1a)	0,0121	9,86	9,89	6,21	0,03	3,68	0,83	Nula		
B4 (L3)	0,019	16,62	16,98	10,67	0,35	6,30	5,58	Moderada	3,10	2-3%
B4(A) (L3)	0,0216	11,41	11,43	7,18	0,03	4,26	0,62	Nula		
C1 (L1a)	0,0159	13,41	13,55	6,97	0,14	6,58	2,20	Baixa	2,51	1%
C1(A) (L1a)	0,0181	11,44	11,56	7,20	0,12	4,36	2,83	Baixa		
D1 (L1a)	0,0168	26,07	26,26	16,39	0,18	9,86	1,87	Nula	1,58	2%
D1(A) (L1a)	0,016	19,63	19,73	12,34	0,10	7,39	1,30	Nula		
D2 (L2)	0,0175	21,97	22,23	13,83	0,25	8,40	3,03	Baixa	2,77	4-5%*
D2(A) (L2)	0,0190	33,05	20,79	33,36	0,31	12,57	2,50	Baixa		
D3 (L1b)	0,0166	19,08	20,26	12,34	1,17	7,92	14,83	Boa	9,42	12%
D3(A) (L1b)	0,0183	14,33	14,56	9,01	0,22	5,55	4,01	Baixa		
D4 (L2)	0,0192	13,28	13,42	8,35	0,14	5,07	2,82	Baixa	2,86	2-3%
D4(A) (L2)	0,0177	14,33	14,49	9,02	0,16	5,47	2,89	Baixa		
D5 (L3)	0,0199	17,65	17,92	11,09	0,28	6,83	4,06	Baixa	3,01	8%
D5(A) (L3)	0,0145	15,28	15,39	9,61	0,11	5,78	1,95	Nula		
E1 (L1a/b)	0,0184	20,09	21,24	12,91	1,15	8,33	13,82	Boa	11,75	9%
E1(A) (L1a/b)	0,0167	11,62	12,08	7,33	0,46	4,75	9,67	Moderada		
E1,5 (L2)	1,3959	31,11	18,22	31,59	0,48	13,37	3,58	Baixa	3,64	-
E1,5(A) (L2)	1,3959	27,30	15,76	27,74	0,44	11,98	3,70	Baixa		
E2 (L3)	0,0191	24,51	24,71	15,43	0,20	9,28	2,20	Baixa	2,06	4-5 %
E2(A) (L3)	0,0163	15,48	15,59	9,73	0,11	5,85	1,91	Nula		
E2,5 (L2)	1,3959	39,54	23,83	39,73	0,19	15,90	1,20	Nula	1,81	-
E2,5(A) (L2)	1,3959	31,80	18,75	32,12	0,32	13,37	2,42	Baixa		
E3 (L1a)	0,0169	13,82	13,89	8,70	0,08	5,20	1,51	Nula	1,57	3%
E3(A) (L1a)	0,0189	27,07	27,24	17,03	0,17	10,21	1,62	Nula		
F1 (L1a)	0,0177	13,81	14,20	8,70	0,39	5,50	7,11	Moderada	7,08	-
F1(A) (L1a)	0,0142	14,00	14,41	8,71	0,40	5,70	7,05	Moderada		

F1,5 (L1a)	0,6155	31,83	19,46	32,46	0,63	13,00	4,86	Baixa	5,56	5%
F1,5(A) (L1a)	0,6155	25,80	15,61	26,48	0,68	10,87	6,26	Moderada		
F2 (L3)	0,0161	16,34	16,66	10,27	0,32	6,40	5,08	Moderada	4,37	6-7%
F2(A) (L3)	0,0181	10,14	10,28	6,37	0,14	3,91	3,66	Baixa		3-4%
F2,5 (L3)	0,0191	13,83	14,19	8,71	0,36	5,47	6,50	Moderada	6,52	5%
F2,5 (A) (L3)	0,014	13,73	14,08	8,66	0,35	5,43	6,54	Moderada		7%
F2,75 (L1b)	1,3959	51,41	31,00	53,00	1,58	22,00	7,19	Moderada	7,39	6-7%
F2,75(A) (L1b)	0,6155	29,81	18,16	30,77	0,96	12,61	7,58	Moderada		
F3 (L3)	0,0155	18,90	19,28	11,93	0,38	7,36	5,17	Moderada	5,85	3%
F3(A) (L3)	0,0167	18,66	19,14	11,78	0,48	7,36	6,52	Moderada		
F3,5 (L3)	0,6155	23,75	14,36	23,98	0,23	9,62	2,38	Baixa	2,92	-
F3,5(A) (L3)	0,6155	32,21	19,70	32,65	0,45	12,96	3,45	Baixa		
G1 (L1a)	0,0205	17,40	17,60	10,94	0,20	6,66	3,00	Baixa	3,26	4%
G1(A) (L1a)	0,0157	13,61	13,79	8,54	0,18	5,25	3,51	Baixa		
G1,5 (L1a)	1,3959	58,91	35,68	60,70	1,79	25,02	7,15	Moderada	7,23	-
G1,5(A) (L1a)	1,3959	31,74	18,92	32,75	1,01	13,83	7,31	Moderada		
G2 (L3)	0,0166	15,66	15,75	9,86	0,10	5,89	1,63	Nula	1,64	1-2%
G2(A) (L3)	0,0173	17,52	17,63	11,04	0,11	6,59	1,64	Nula		
G2,5 (L3)	1,3959	31,38	18,79	31,63	0,25	12,84	1,94	Nula	1,74	-
G2,5(A) (L3)	0,6155	13,12	7,66	13,21	0,09	5,55	1,53	Nula		
Média Total									3,66	

Tab. 5.1 – Resultados da porosidade obtidos através do ensaio da saturação em água, e estimados em Lâmina delgada.

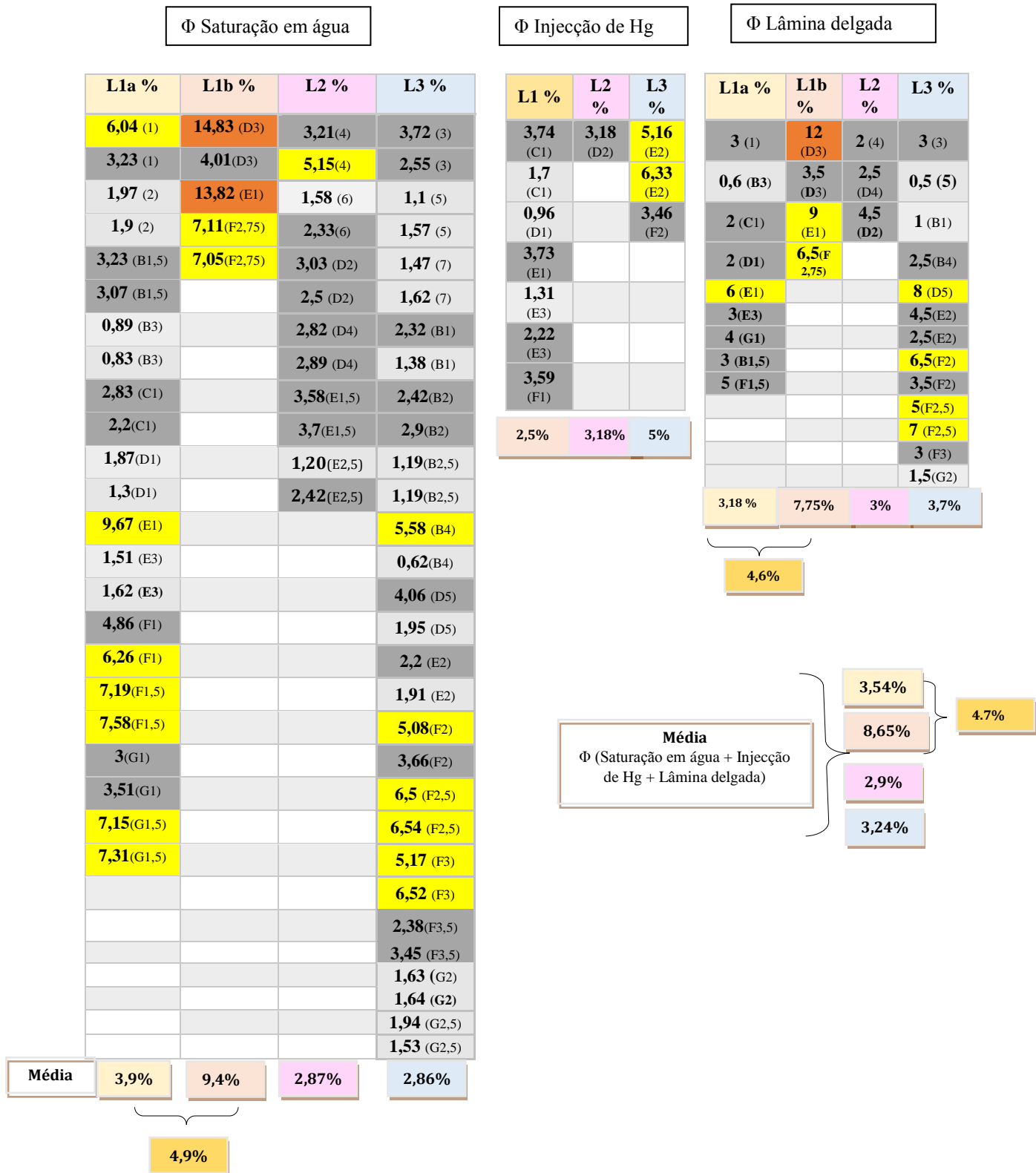
* o valor foi obtido sem coloração com azul Ceres, os poros foram detectados por terem propriedades iguais à resina (que os preencheu)

5.5. Resultados dos ensaios de porosidade através do porosímetro de expansão de gás Hélio e de permeabilidade pelo permeâmetro de gás digital

Referência/ Litofácies	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Bulk Volume (cc)	Pore volume (cc)	Grain volume (cc)	Grain density (g/cc)	Porosity (%)	Gas permeability (mD)
C1 (L1a)	7,899	3,5395	-	-	-	-	3,74	0,03
C1(A) (L1a)	6,391	3,528	62,48	1,06	61,41	2,69	1,70	0,020
D1 (L1a)	6,607	3,532	64,73	0,62	64,12	2,71	0,96	0,018
D2 (L2)	6,288	3,532	61,61	1,96	59,65	2,70	3,18	0,019
E1 (L1a)	6,973	3,536	64,02	2,72	65,94	2,71	3,73	0,018
E2 (L3)	6,955	3,529	-	-	-	-	5,16	160,34
E2(A) (L3)	6,530	3,533	64,02	4,05	59,96	2,70	6,33	0,021
E3 (L1a)	7,038	3,524	68,65	0,90	67,75	2,69	1,31	0,017
E3(A) (L1a)	6,8345	3,533	-	-	-	-	2,22	0,12
F1 (L1a)	5,583	3,533	54,73	1,97	52,77	2,71	3,59	0,019
F2 (L3)	7,049	3,541	69,42	2,40	67,02	2,69	3,46	0,017
Média Total							3,22	14,6

Tab. 5.2 – Resultados da porosidade e permeabilidade obtidos através dos métodos do porosímetro de expansão de gás He e permeâmetro de gás digital, respectivamente.

5.6. Porosidade versus Litofácies



Tab. 5.3 – Relação entre a porosidade obtida nos diferentes métodos e litofácies

5.7. Tipos de poros *versus* Litofácies

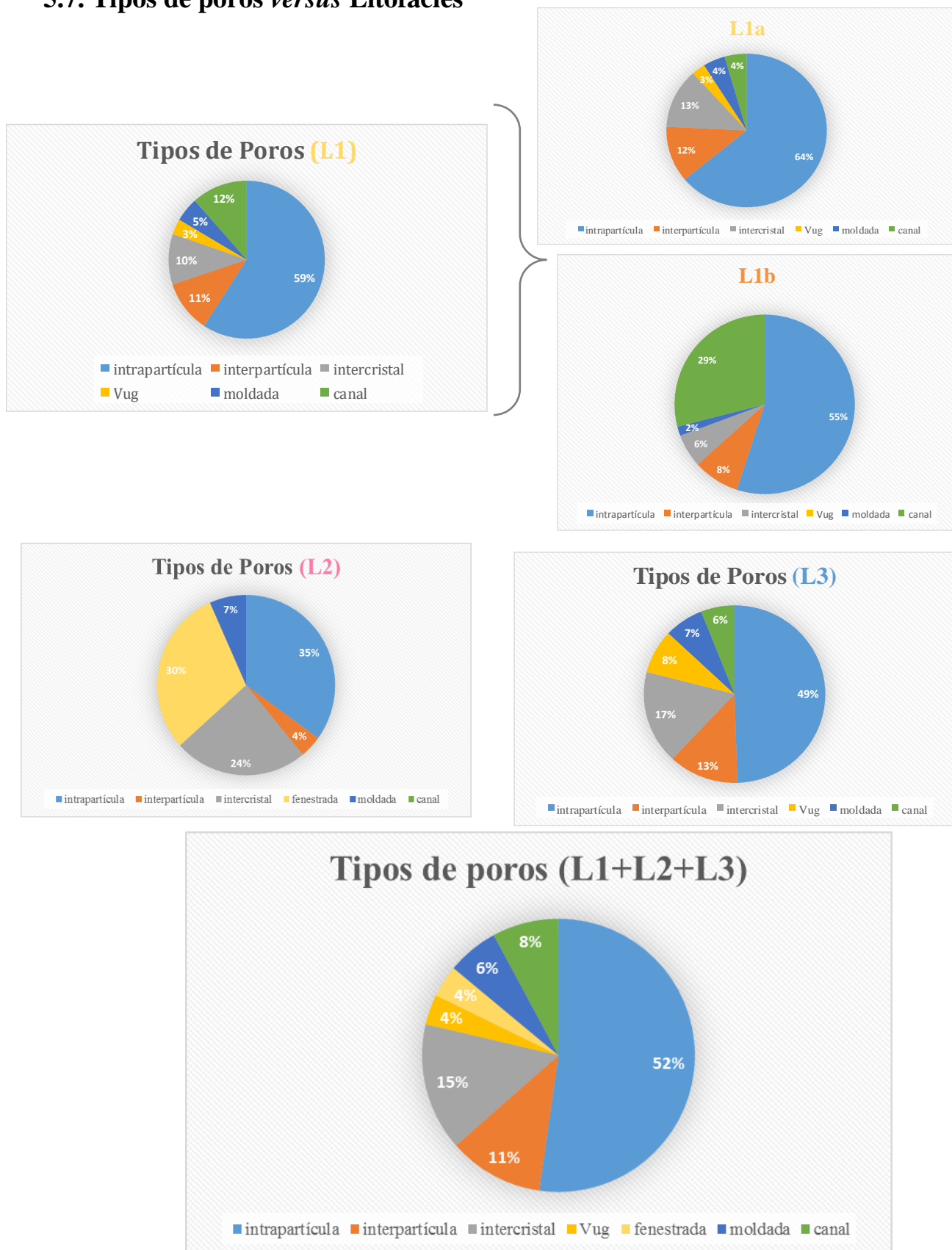


Fig. 5.80 - Relação entre a proporção dos tipos de poros com as diferentes litofácies.

6. Modelação do reservatório: modelo de fácies e modelo de porosidade

6.1 – Metodologia de Estudo

Para realizar o modelo estático do reservatório utilizou-se o *software* Petrel (versão 2014) da *Schlumberger*, de acordo com as etapas que estão ilustradas na imagem abaixo (Fig. 6.1).

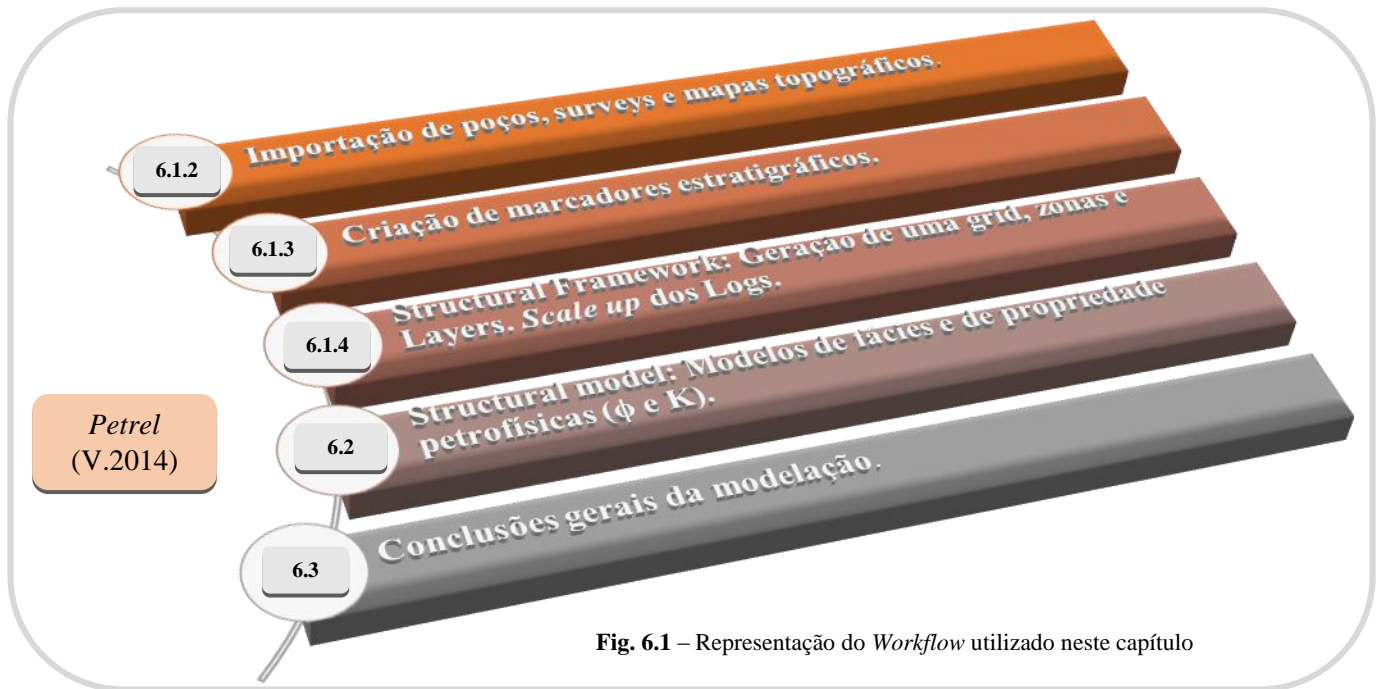


Fig. 6.1 – Representação do *Workflow* utilizado neste capítulo

6.1.1. Alguns conceitos de profundidade em poços: TVT, MD, TVDSS

Durante este trabalho são utilizados alguns termos relativos à profundidade. A MD (*Measured Depth*), é a profundidade medida ao longo do percurso do poço; a TVD (*True Vertical Depth*) é a distância vertical absoluta entre o datum e o fim do poço; a TVDSS (*True Vertical Depth Subsea*) corresponde à TVD mas considerada apenas a partir do nível médio das águas do mar (Fig. 6.2).

Datums de referência comumente utilizados são o nível do substrato (*ground level- GL*), *kelly bushing* (KB), e o nível médio das águas do mar (NMM), tendo sido este último o utilizado no modelo.

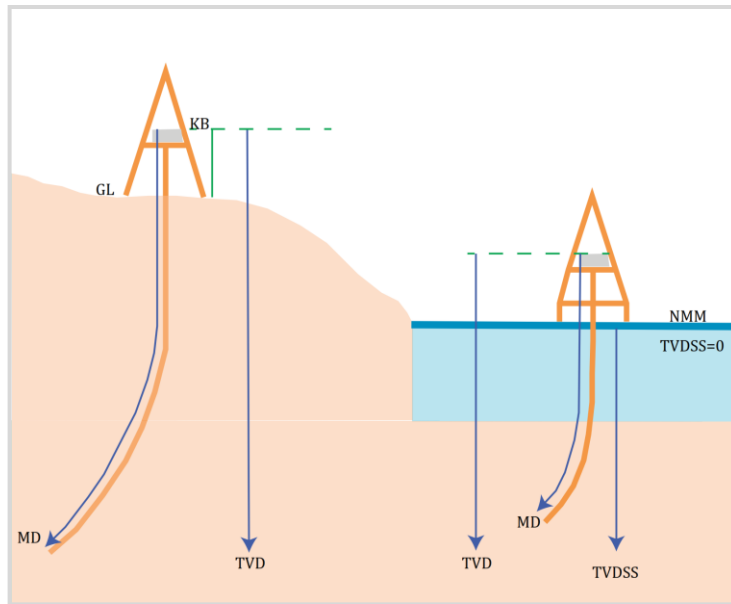


Fig. 6.2 – Representação esquemática da MD, TVD e TVDSS

6.1.2. Importação de Poços

Para a elaboração do modelo estático foram criados poços fictícios verticais que passassem pelos locais de amostragem, ou próximos destes (Fig. 6.3).

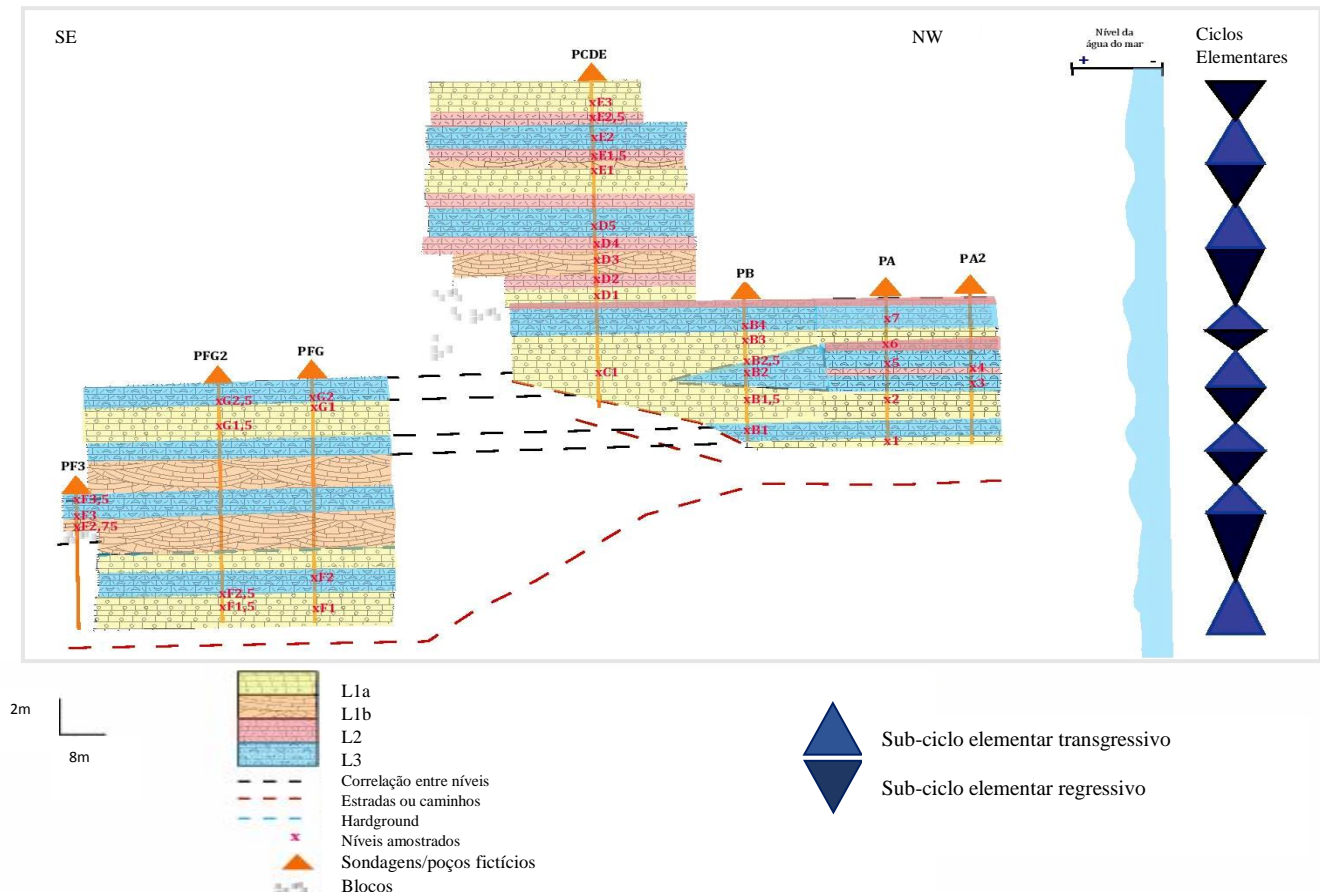


Fig. 6.3 – Representação dos poços fictícios e locais de amostragem. Esquematização das litofácies presentes no afloramento e correspondência destas com as oscilações de alta frequência do mar (ciclos elementares).

Na importação de cada poço foram inseridas coordenadas de superfície GPS, sendo georreferenciados no sistema *World Geodetic System 84 (WGS84)*, datum *UTM Zone 29N*. Foram posteriormente importadas as trajectórias em profundidade (*Surveys*) para cada poço utilizando este mesmo sistema de coordenadas.

Adicionalmente foi também incluída a topografia do local em estudo, para a criação de um modelo mais realista. Assim sendo, utilizou-se o software ARCGIS da ESRI, de forma a obter esta superfície topográfica em formato digital. Apenas foram digitalizadas as curvas de nível inseridas no quadrado a verde ilustrado na figura abaixo (Fig. 6.4)

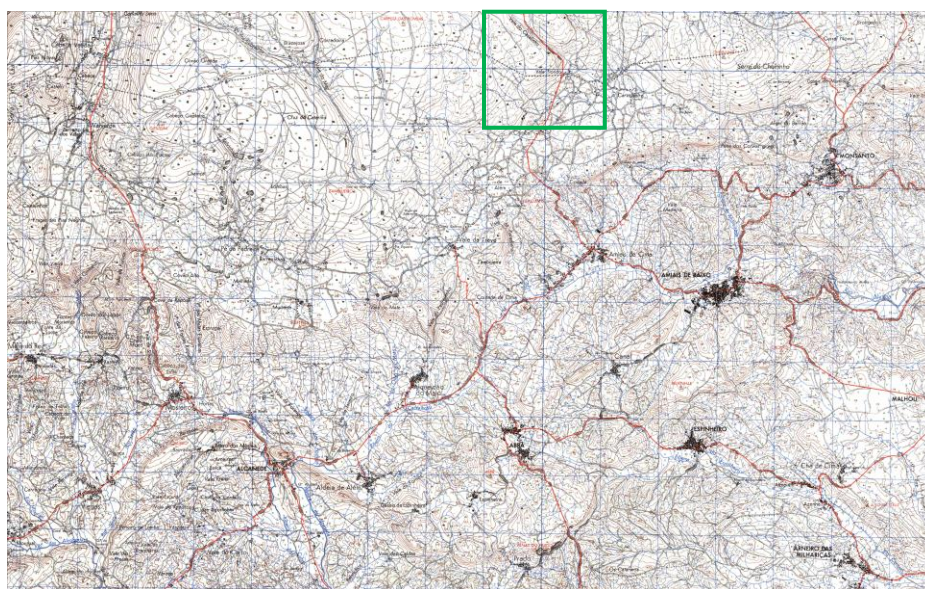


Fig. 6.4 – Carta Topográfica 328 à escala 1:25 000, do IGeoE (Instituto Geográfico do Exército), e área de interesse que foi seleccionada.

Após a topografia ter sido inserida no Petrel, surgiu a necessidade de criar um polígono que limitasse a zona de estudo (Fig. 6.5) de forma a que a introdução de possíveis erros de extrapolação fosse minimizada.

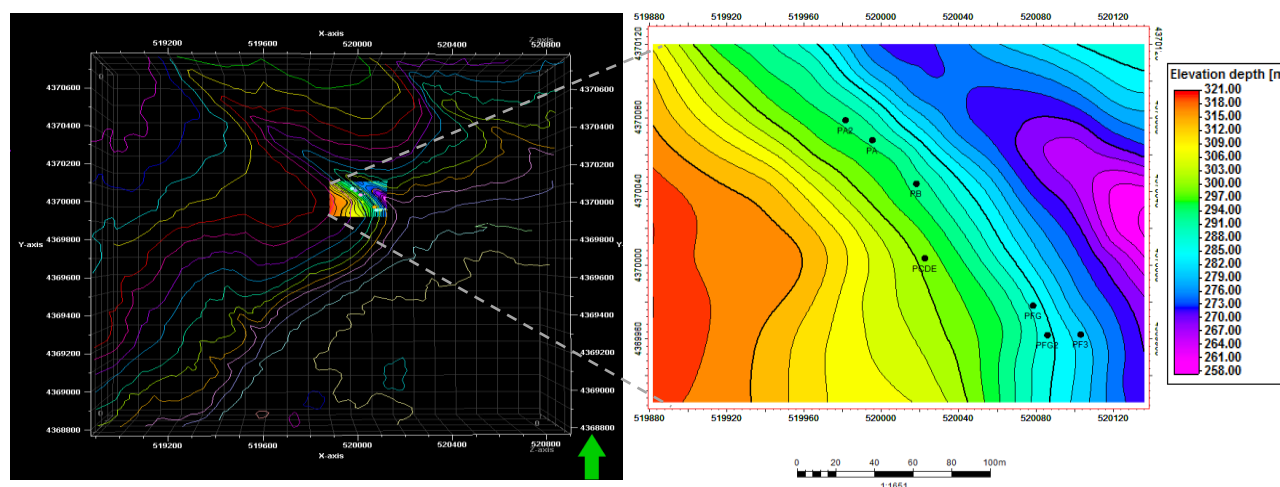


Fig. 6.5 – Curvas de nível e localização geográfica do polígono final da área em estudo e dos poços verticais criados.

6.1.3. Marcadores estratigráficos (definir horizontes e zonas)

O modelo estático necessita primeiramente da construção de um “*structural framework*” em que a primeira etapa consiste na criação de horizontes baseados em marcadores estratigráficos, que neste caso, correspondem ao topo das camadas presentes no afloramento. No projecto em estudo, foram definidos 17 Horizontes, correspondendo o último horizonte à superfície topográfica (H16) e o primeiro à base da primeira camada que aflora (HNB).

É de salientar que algumas das camadas não estão presentes em todos os poços, por exemplo, as camadas correspondentes aos horizontes do 11 ao 16 apenas estão presentes no poço PCDE, tal como está ilustrado na Figura 6.6. Apesar desta ausência de algumas camadas em alguns poços, e por forma a simplificar o *framework* estratigráfico, estes horizontes foram marcados em todos os poços tendo sido dada a espessura mínima aceitável entre eles, nesses casos.

Para efeitos de realização dos modelos foi necessário criar zonas. Essas zonas (Fig. 6.6) foram definidas por ciclos de litofácies que se vão repetindo verticalmente no afloramento devido a pequenas oscilações do nível do mar (ciclos elementares) aquando da formação dessas camadas (ver Fig. 6.3). Foram então definidas 7 zonas (Zonas: NB, 3, 5, 7, 9, 11 e 14).

No polígono definido como sendo a área em estudo as camadas vão desaparecendo seguindo a topografia e à medida que se aproximam da linha de água, sendo que a NE da linha de água as camadas desaparecem completamente. Para reproduzir no Petrel essa realidade teve de se criar alguns pseudo-poços (*dummy wells* – de D1 a D6 – Fig. 6.7).

SE

NW

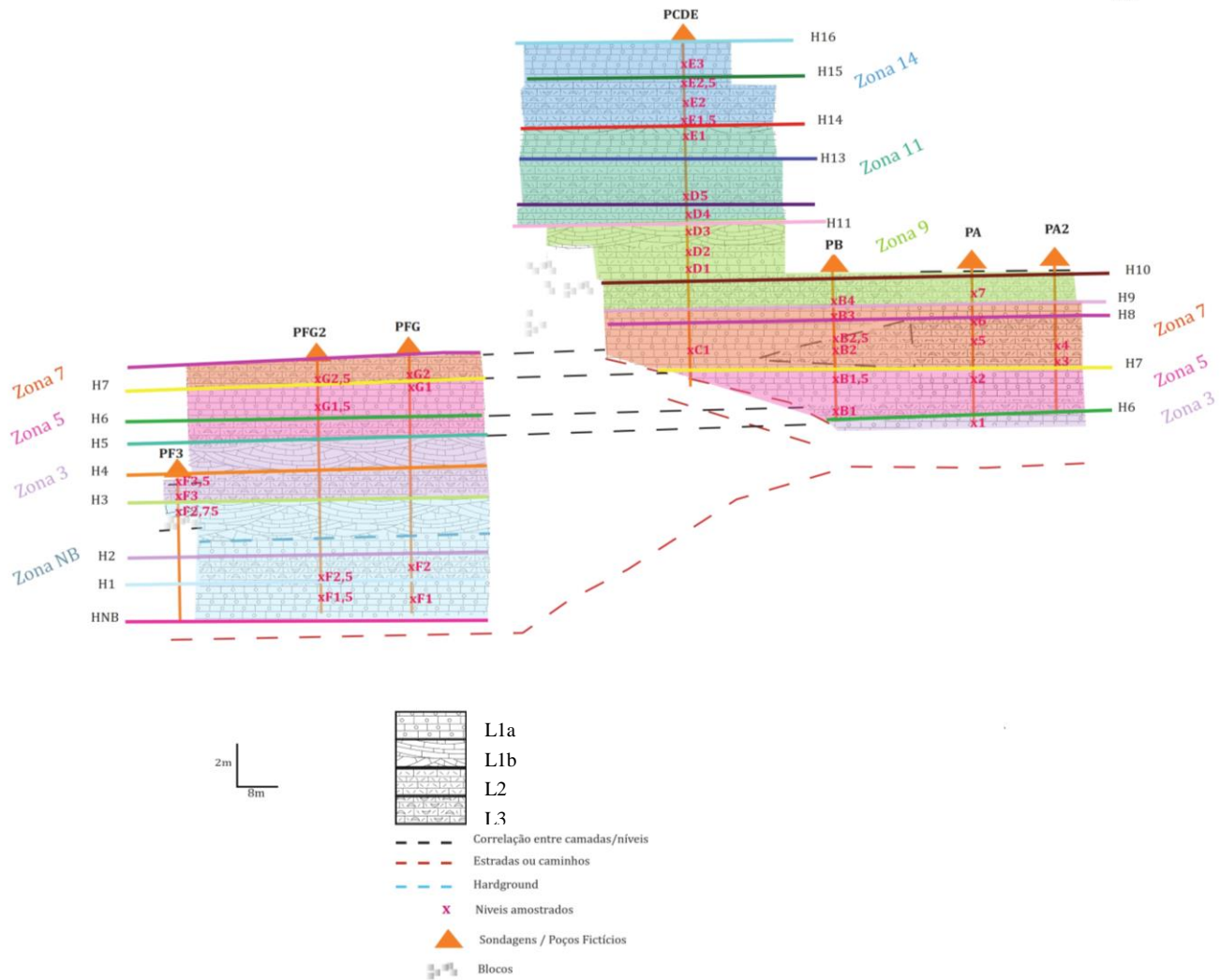


Fig. 6.6. – Zonas e Horizontes/níveis geológicos correspondentes (*well tops*).

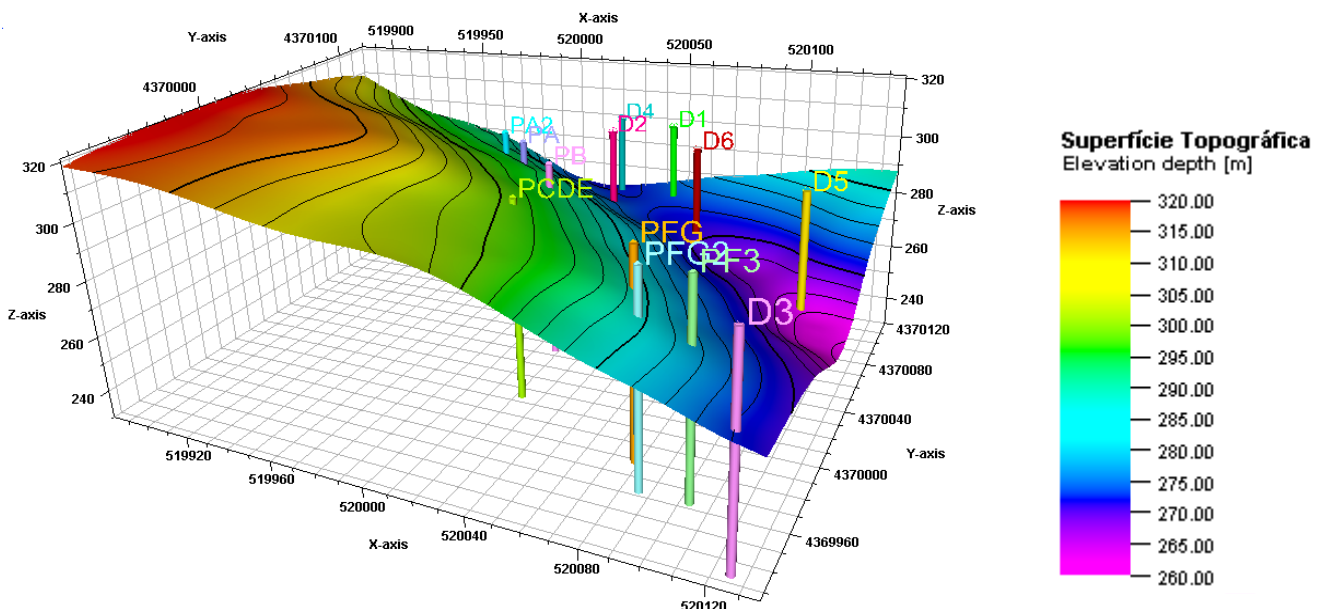


Fig. 6.7. – Localização dos poços verticais e *dummy wells*. Imagem sobrelevada 1,2x.

No *software* as zonas mencionadas foram criadas seguindo três passos, como se encontra abaixo ilustrado (Fig. 6.8):

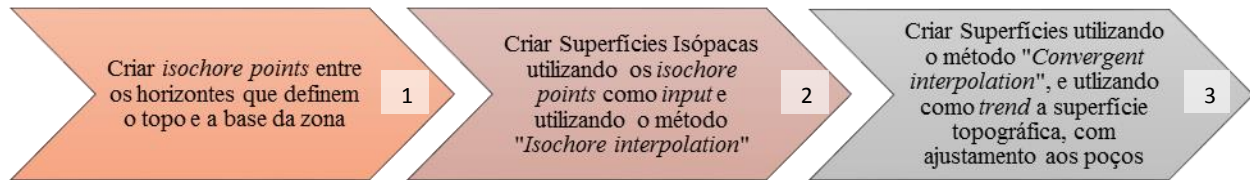


Fig. 6.8. – Passos para criação de superfícies.

No Ponto 2) é necessário fazer controlo de qualidade baseado na estatística de cada superfície gerada. Este controlo passa por verificar se existe algum valor de espessura igual ou menor que 0, o que não é geologicamente possível. Caso existam valores de espessuras dessa ordem estes terão de ser alterados para o valor de espessura mínimo possível, através de operações na calculadora do Petrel.

Cada superfície gerada terá de passar por dois novos controlos de qualidade, primeiramente um controlo com o objectivo de avaliar sobreposições e alterações entre as camadas (uma vez mais utilizando operações aritméticas) e posteriormente (já no passo 3) um controlo onde se pretende que o *match* entre o poço e a superfície determinada estejam correctos, isto é, sejam correspondentes.

Destes três passos, e após feitos todos os controlos de qualidade obtiveram-se as superfícies que podemos observar na figura abaixo (Fig. 6.9).

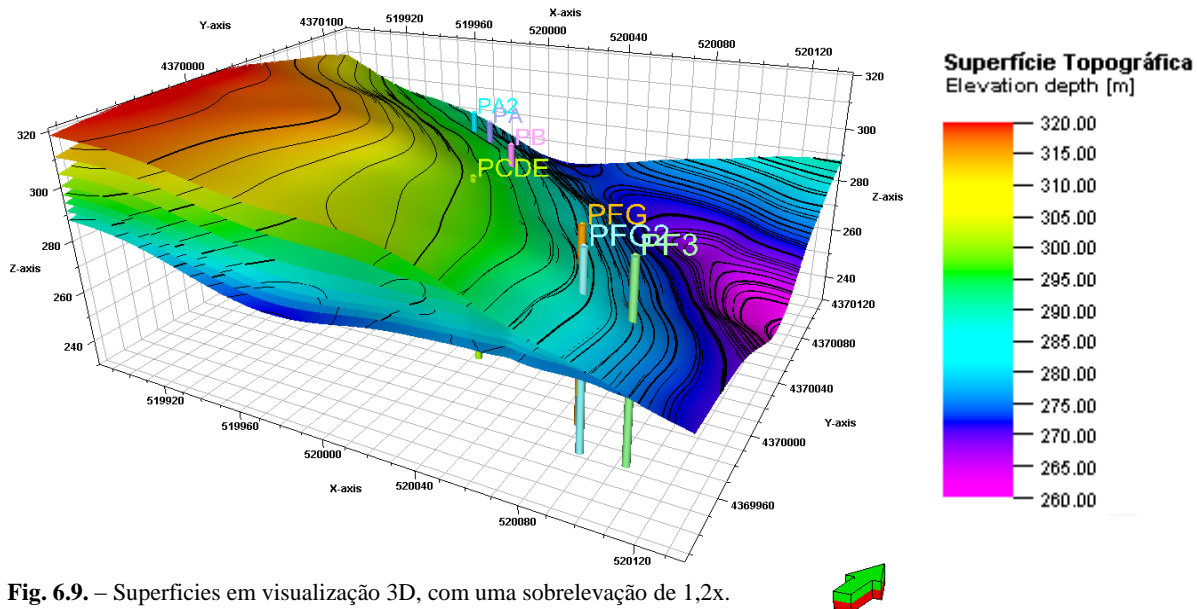


Fig. 6.9. – Superfícies em visualização 3D, com uma sobrelevação de 1,2x.

6.1.4. Framework dos Modelos: Criar a Malha (Grid), Zonas e Layering. Upscaling dos Logs (Scale-up Well Logs)

O *framework* do modelo é criado através do *structural modeling*. O primeiro passo é criar um esqueleto (Fig. 6.10) com o mesmo limite (Tab. 6.1) que já inclui as superfícies e utilizando também o mesmo espaçamento (2*2m). A importância do esqueleto é limitar modelo confinando-o ao topo e base das superfícies de entrada.

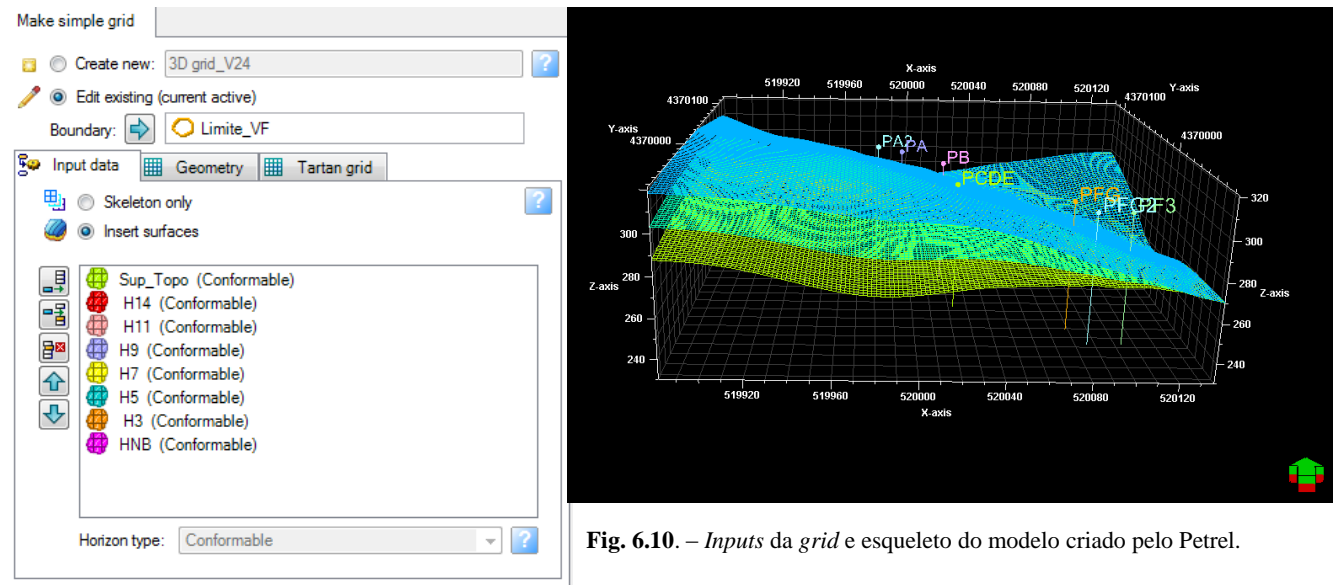


Fig. 6.10. – Inputs da grid e esqueleto do modelo criado pelo Petrel.

Axis	Min	Max	Delta
X	519882m	520136m	254m
Y	4369926m	4370120m	194m
Z	256.99m	321.05m	64.06m
Lat	39°28'43.29"N	39°28'49.60"N	0°00'6.3142"
Long	8°46'7.7815"W	8°45'57.1285"W	0°00'10.6520"

Grid Cells (nIxnJxnGridLayers)	127x97x28
Total Number of Grid Cells	344932

Tab. 6.1 – Limite e número de células da *grid*.

O passo seguinte consiste na construção de horizontes (*make horizons*). As superfícies são automaticamente inseridas como *input*, acrescentando-se os well tops correspondentes. É necessário dar a informação se o horizonte está em conformidade com os outros ou não (p.ex: erosional) (Fig. 6.11).

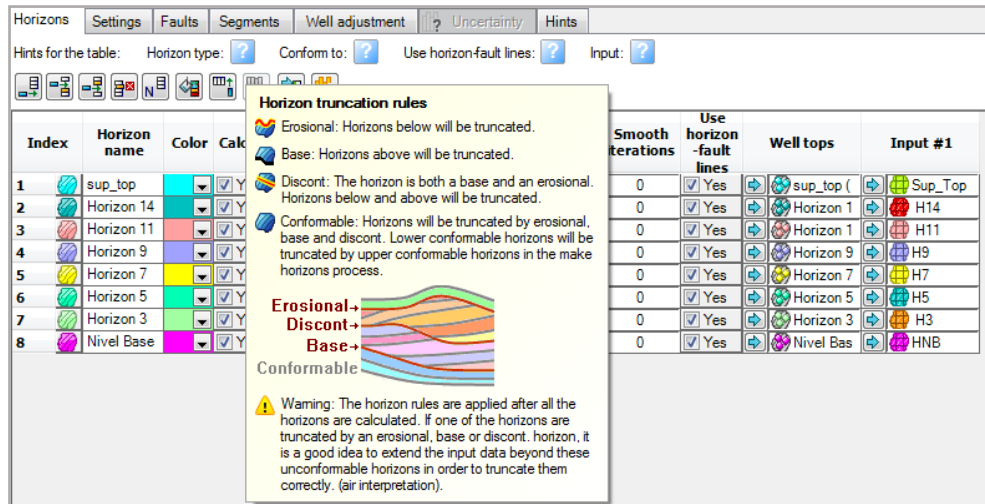


Fig. 6.11. – Tipos de terminação de horizontes.

No caso das zonas (*make zones*), estas são construídas proporcionalmente a partir do horizonte de topo e ao longo da espessura estratigráfica (Fig. 6.12).

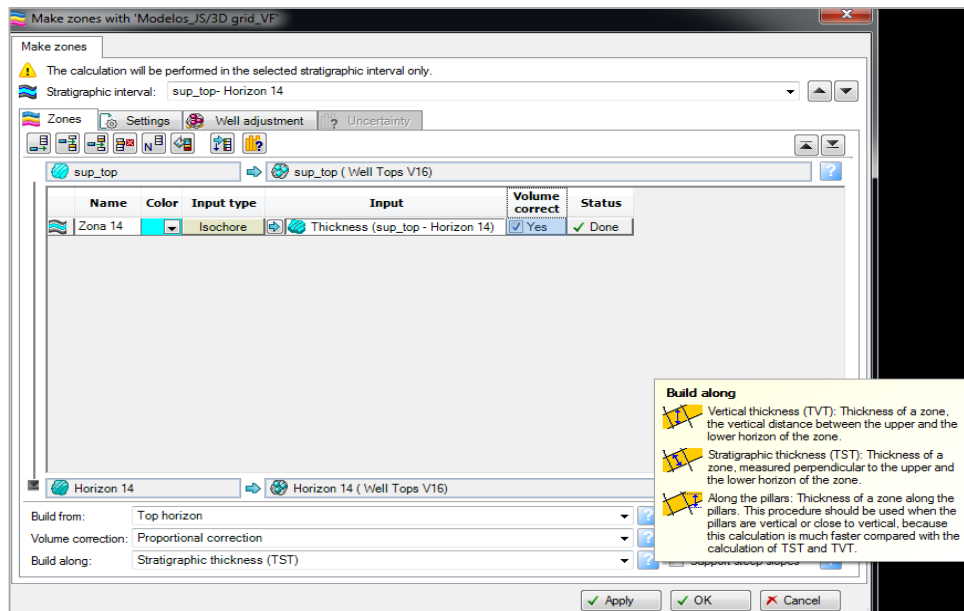


Fig. 6.12. – Parâmetros de criação de zonas (*make zones*).

Finalmente é feito o *Layering*. Inicialmente este foi feito de forma proporcional, no entanto após o *upscale* dos Logs de fácies e de porosidades, optou-se por se utilizar fracções (Fig. 6.13) de forma a ficar mais semelhante à realidade.

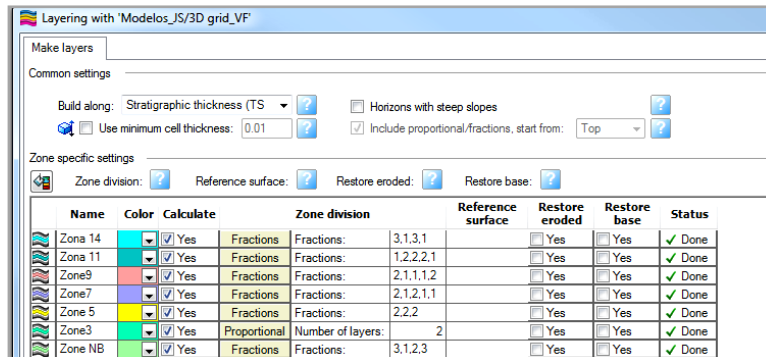


Fig. 6.13. – *Layering* e fracções utilizadas no mesmo.

Seguidamente faz-se o *upscale* dos logs. Primeiramente criam-se atributos de logs (*Log attributes*) para as fácies e porosidade e adicionam-se esses atributos dentro de cada poço. De seguida no *property modeling* faz-se o *upscale* dos logs para o resto da área (Fig. 6.14 e 6.16).

Neste passo, o método de *layering* tem bastante importância, pois o *upscale* faz médias de valores dentro de cada layer, por isso diferentes fácies ou grandes diferenças de porosidade ou permeabilidade deverão estar em *layers* diferentes para que essa heterogeneidade seja mantida. Os *upscales* foram feitos utilizando o método de média aritmética.

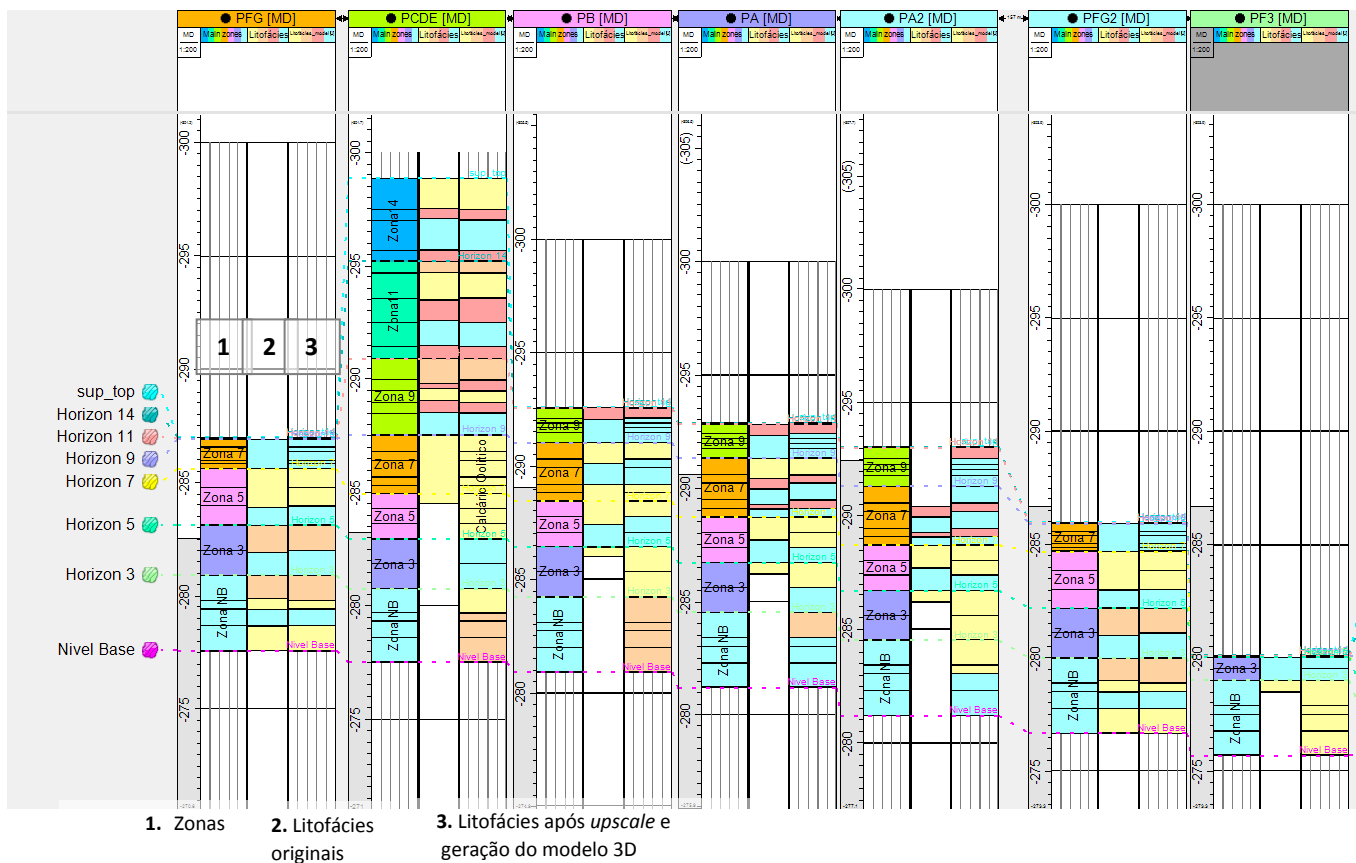


Fig. 6.14. –Log original das fácies Vs Log após o *upscale* para a *grid* e após geração do modelo 3D.

O *upscale* do log das porosidades foi feito usando o log das litofácies após o *upscale* como *bias* (Fig. 6.15).

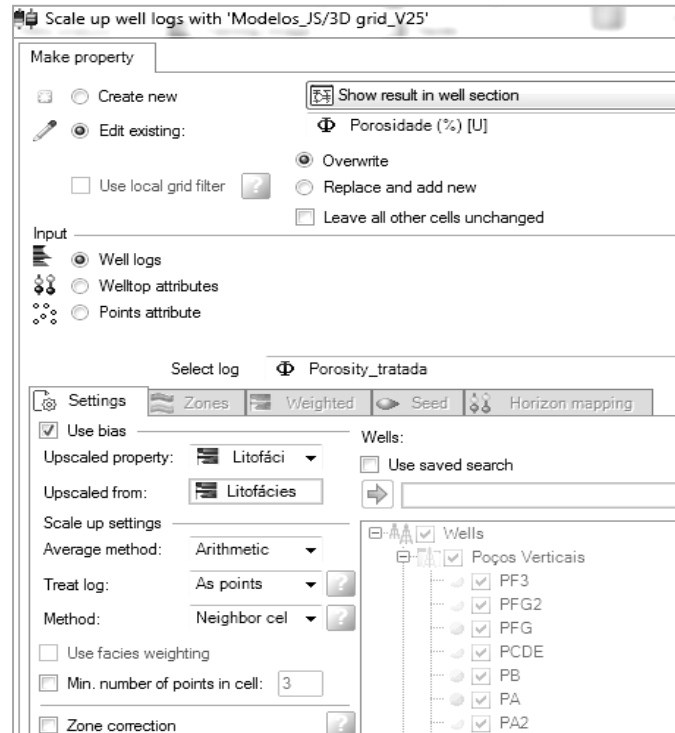


Fig. 6.15. – Parâmetros do *upscale* das porosidades.

A escala de cores foi definida entre 0 e 15%, pois os valores obtidos variam de 0,88% a 14,8% na realidade, no entanto, as porosidades dos carbonatos podem atingir valores maiores que 20% .

O resultado obtido está ilustrado na imagem abaixo (Fig. 6.16).

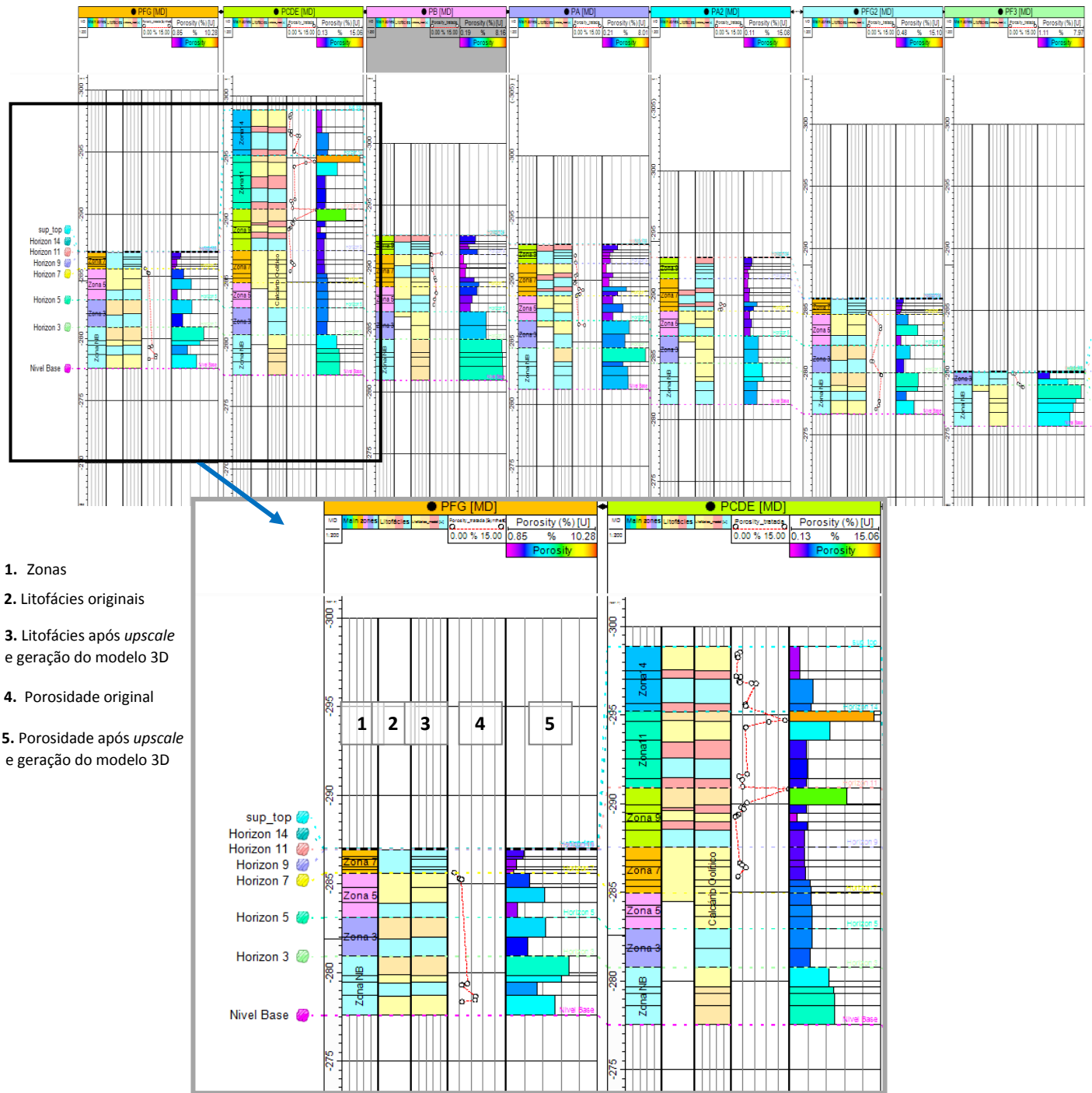


Fig. 6.16. – Log Litofácies Vs Log de litofácies após *upscale* para a *grid* e geração do modelo 3D ; Log de porosidades Vs Log de porosidade após *upscale* para a *grid* e geração do modelo 3D

6.2. Modelo de Fácies

O modelo de fácies foi elaborado utilizando a ferramenta de Petrel *facies modeling*. Para cada zona define-se a percentagem de cada litofácies bem como o variograma. Na maioria dos casos optou-se por usar as percentagens predefinidas nos poços (*well data*) assumindo-se que no resto da área as proporções dessas fácies serão aproximadamente as mesmas. O variograma (Fig. 6.17) foi definido para coincidir com a direcção aproximada do afloramento e das fronteiras com formações de idade distinta, que se pode observar na carta geológica. O variograma foi mantido para todas as zonas.

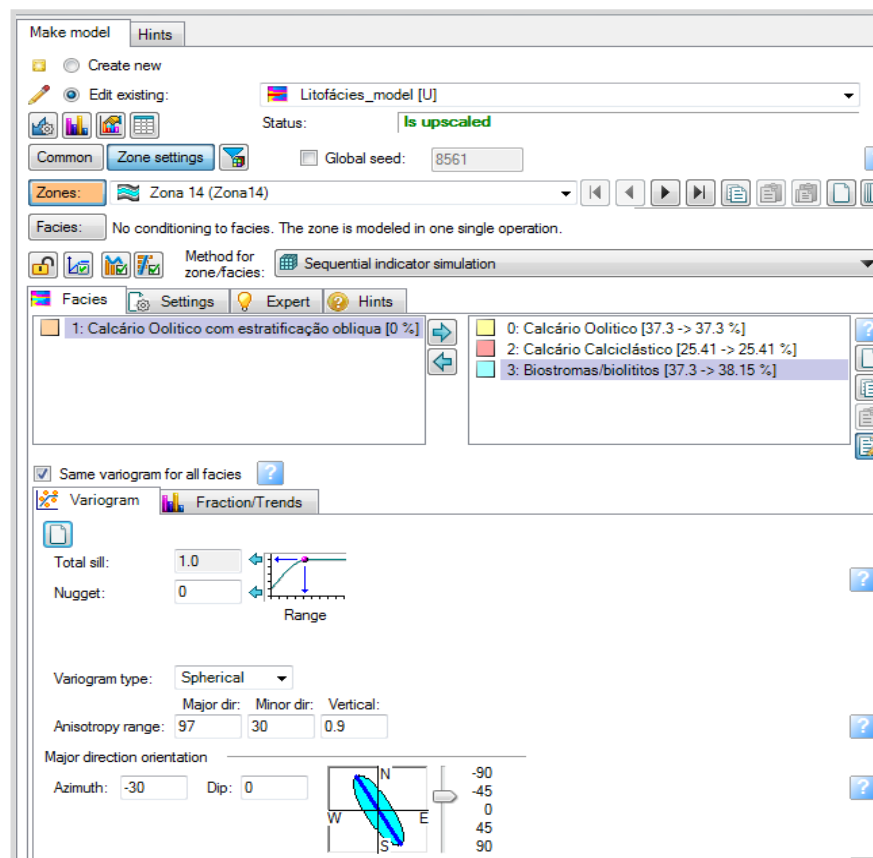
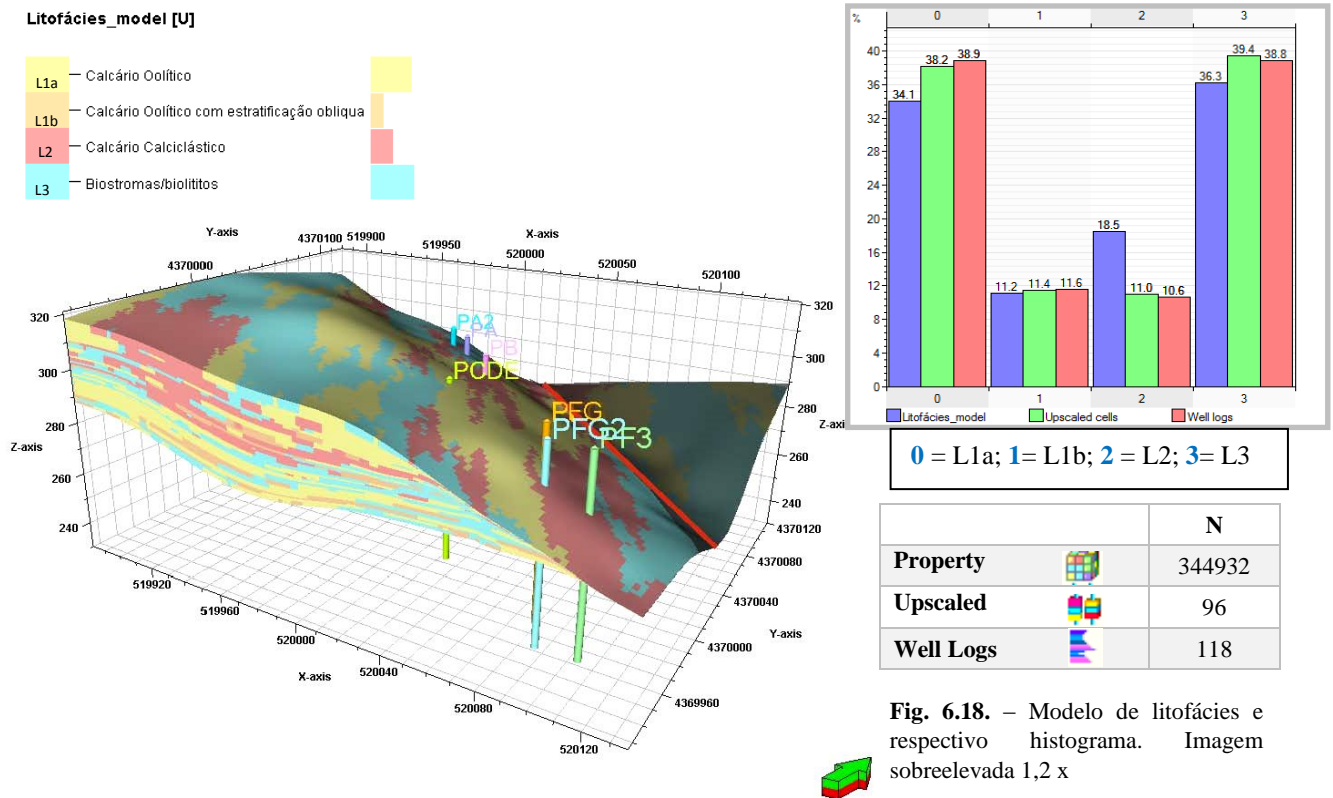


Fig. 6.17. – Parâmetros de entrada para realização do modelo de fácies

O método utilizado para fazer este modelo foi o *sequential indicator simulation*, pois este é o método que mais se adequa a dados discretos onde a forma dos geobodies de uma fácies particular é incerta ou quando estas são controlados por *trends*.



Na Figura acima (Fig. 6.18), está representado o modelo de fácies para toda a área de estudo. Pode-se ver que a litofácies que existe em maior percentagem, com um total de cerca 45% é litofácies 1 (34% L1a, 11% L1b), seguido da litofácies 3 (~36%) e finalmente a litofácies 2 (~19%). Estas percentagens tem um erro associado visto que as zonas apresentadas a sombreado (Fig. 6.18 e Fig. 6.19) não deveriam existir, como já foi previamente referido. Contudo, a proporção das litofácies na zona sombreada parece ser semelhante à do histograma e por isso o erro é “diluído”. Além disso estas zonas são muito pouco espessas e por isso representam apenas uma percentagem muito pequena no histograma. No geral, o modelo honra as percentagens de fácies dos poços.

Na imagem abaixo (Fig.6.19) pode-se observar o modelo de fácies para cada uma das zonas (ciclos), numa layer representativa. Em todas as imagens foi marcada a falha normal reactivada como desligamento direito de direcção aproximada NW-SE (com doleritos associados) que se encontra marcada na carta geológica e que é coincidente com a linha de água.

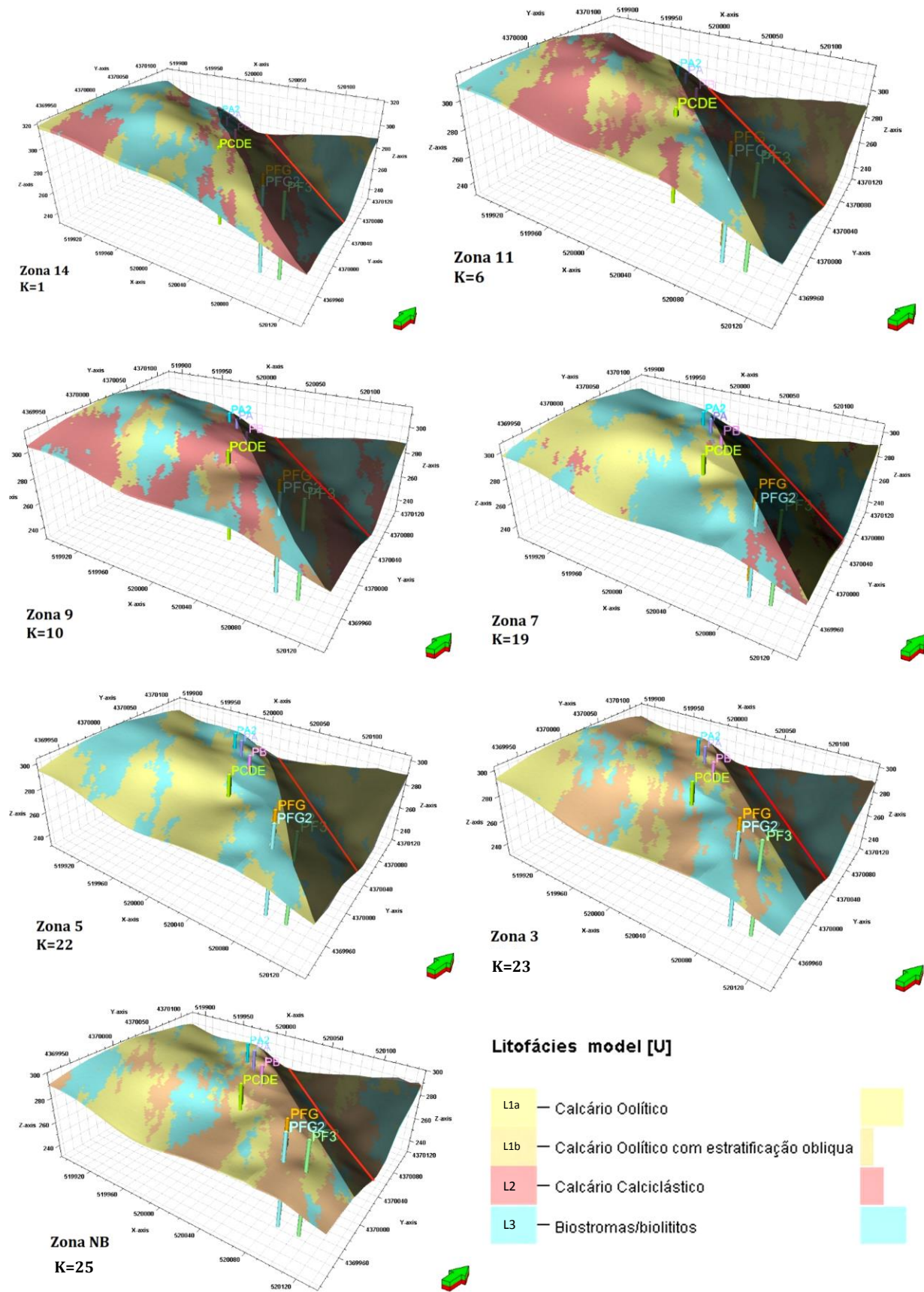
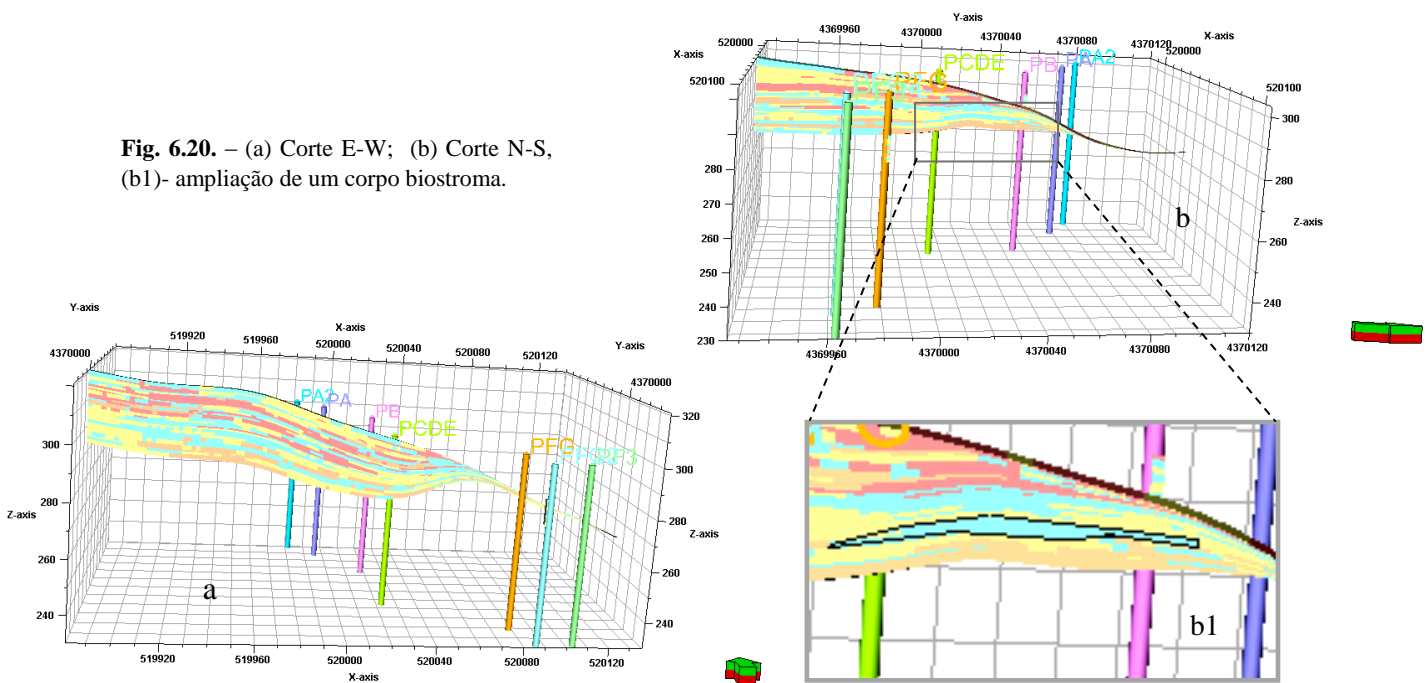


Fig. 6.19. – Modelo de Fácies em cada uma das zonas numa determinada Layer (K).
Imagens sobreelevadas 1,2 x

Na Figura abaixo (Fig.6.20) observam-se dois cortes da área, um com orientação N-S e outro E-W, sendo perceptível que as zonas vão adelgaçar junto à área próxima à linha de água, apresentando uma geometria em cunha. Podem-se também observar diversas variações laterais de fácies. Ainda na Figura, no corte N-S na secção b1, observa-se um corpo biostroma com geometria lenticular, rodeado por calcários oolíticos (L1a); se este corpo tiver altos valores de porosidade e permeabilidade, e os calcários oolíticos que o envolvem tiverem permeabilidade muito baixa, o conjunto formaria potenciais reservatório e armadilha estratigráfica/diagenética.

Fig. 6.20. – (a) Corte E-W; (b) Corte N-S, (b1)- ampliação de um corpo biostroma.



6.3. Modelo de Porosidade

Para realizar o modelo de porosidade, utiliza-se o *property modeling* e selecciona-se o *petrophysical modeling*. Para cada zona vão-se seleccionando as litofácies que existem nela, e o *software* fará a estimativa do mínimo e máximo valor de porosidade. A distribuição escolhida é a distribuição normal, sendo que o Petrel estima a média e o desvio padrão (Fig. 6.21). O desvio padrão poderá ser alterado para um melhor ajuste à realidade.

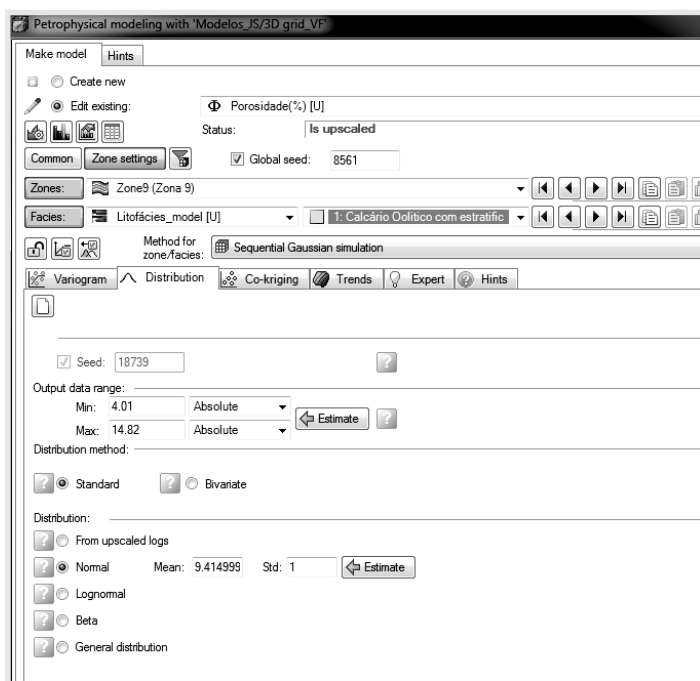


Fig. 6.21. – Exemplo de parâmetros de entrada no modelo de porosidades

O método utilizado foi o *Sequential Gaussian Simulation* (SGS), por ser o mais adequado para propagar a porosidade. Este método é uma técnica de modelação baseada em pixéis, e é um método estocástico de interpolação baseado no *kriging*, podendo honrar os dados de entrada, distribuições, variogramas e *trends*. Ao criar diversas realizações, o SGS pode ser utilizado para ganhar um entendimento da incerteza. O algoritmo SGS, traça uma localização aleatória entre os poços e estima o valor de *kriging* e desvio padrão, e depois tira uma amostra do histograma gaussiano e une esse valor ao modelo e traça uma nova localização aleatória.

O variograma utilizado foi mantido igual ao utilizado no modelo de fácies, tendo-se obtido como resultado o modelo ilustrado na Fig. 6.22. Pode-se ver que a maior parte das porosidades está no intervalo de 2-3%. Nos intervalos de porosidade de 2-3% e 13-14% a percentagem obtida nas

upscaled cells é superior aos *well logs*; nos restantes intervalos as percentagens obtidas nas *upscaled cells* foram inferiores ao dos *well logs*. Já no modelo a percentagem aumenta em relação às *upscaled cells*, nos intervalos 2-3%, 3-5%, 5-6% e 8-9%.

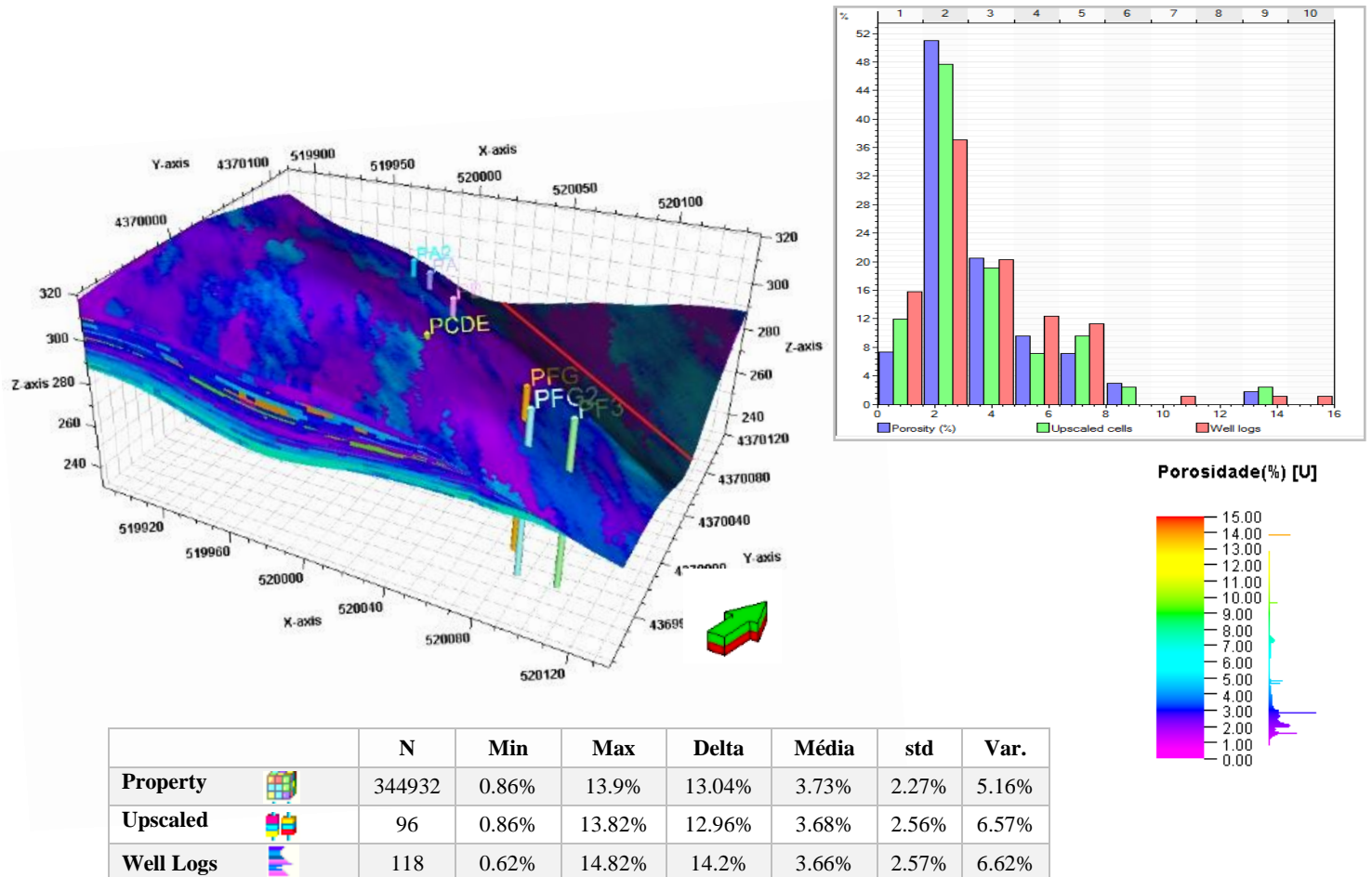


Fig. 6.22. – Modelo de Porosidades (imagem sobrelevada 1,2 x) e respectivo histograma e estatísticas.

Na imagem abaixo (Fig.6.23) está representado o modelo de porosidades nas mesmas zonas e layers do modelo de litofácies. Observa-se que as zonas 11, 9, 3 e NB apresentam os maiores valores de porosidade sendo que os maiores valores dentro dessas zonas estão na litofácies 1 (Calcários oolíticos).

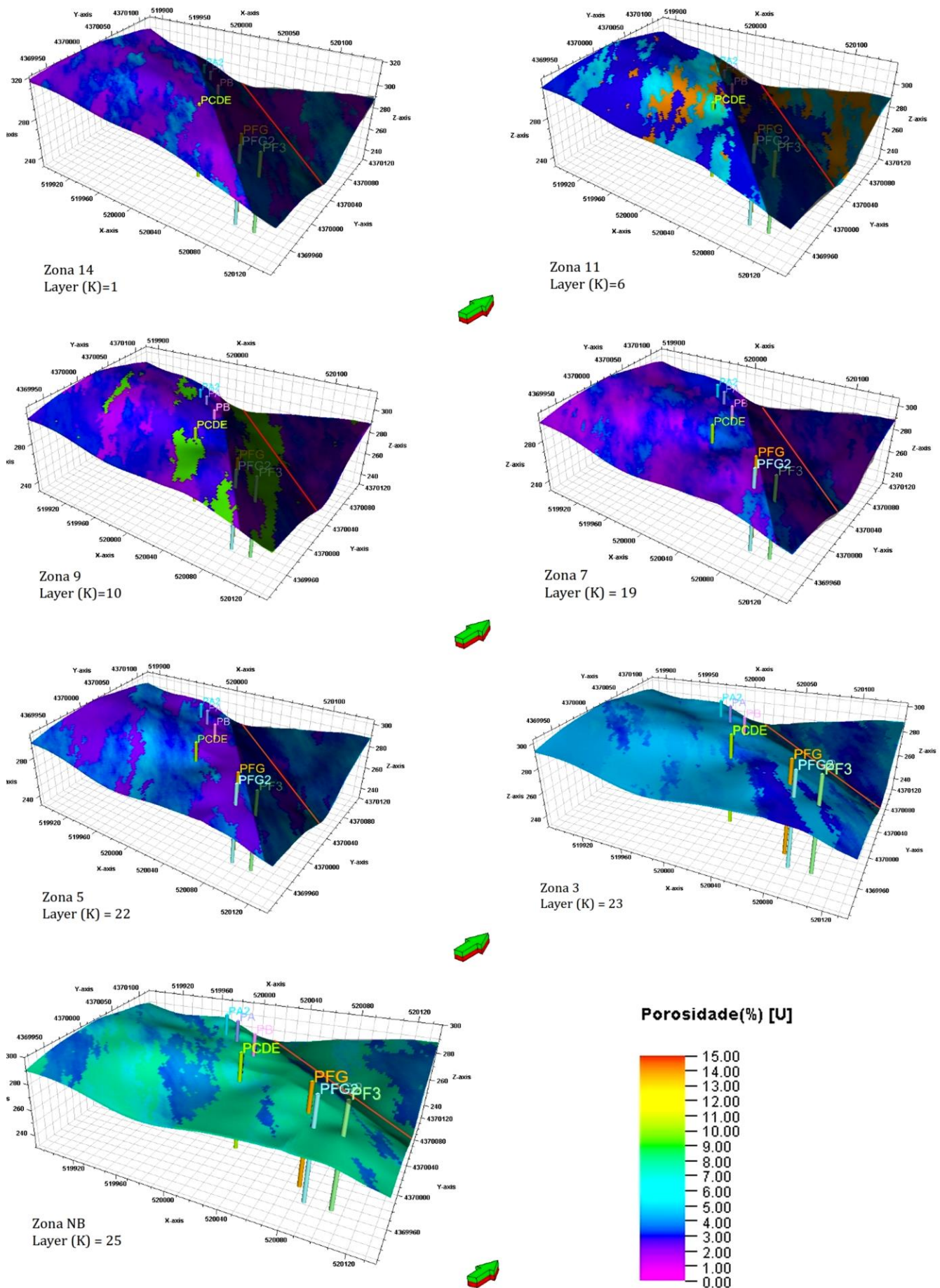


Fig. 6.23. – Modelo de Porosidades em todas as zonas numa determinada layer (K). Imagens sobrelevadas 1,2 x

Nos cortes abaixo (Fig. 6.24 e Fig. 6.25) é possível observar níveis com potencial para reservatório/armadilhas estratigráficas tendo porosidade moderada a boa e estando rodeados por níveis com porosidade baixa. Alguns dos níveis destacados pensa-se terem também uma permeabilidade alta (E2 - Tab. 5.2 e D3 –Fig. 5.64).

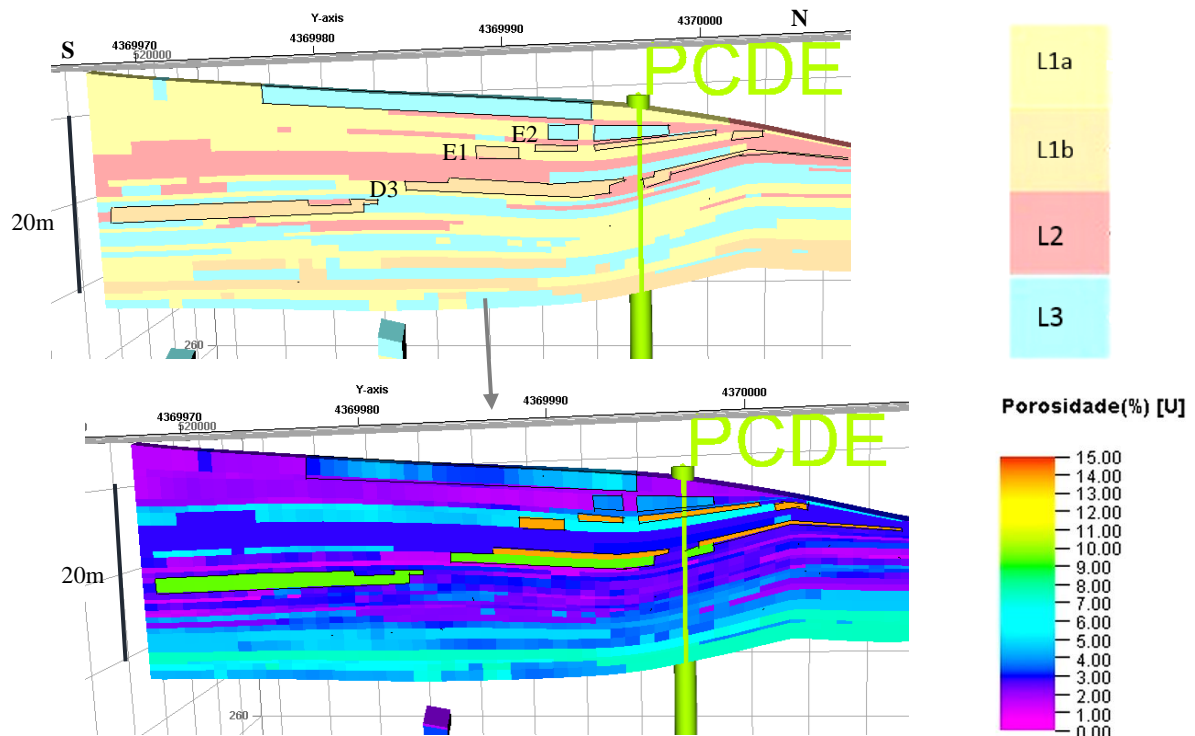


Fig. 6.24. – Exemplos de corpos com porosidade boa e/ou boa permeabilidade. Exemplos nos níveis E2, E1 e D3

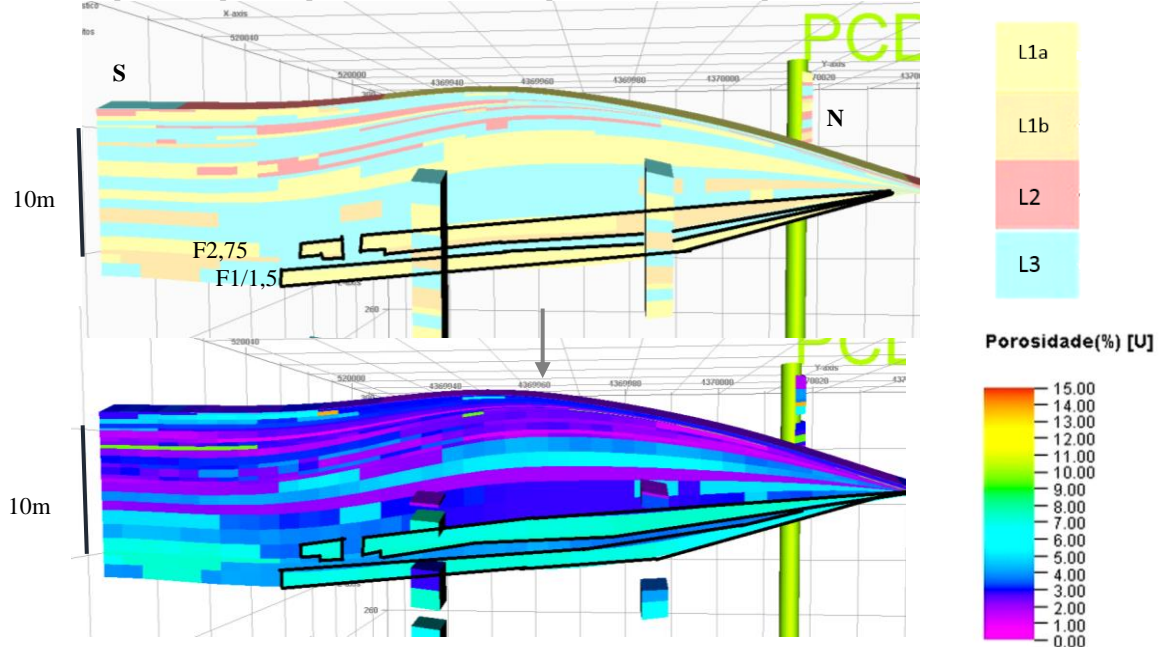


Fig. 6.25. – Exemplos de corpos com porosidade moderada (7-8%) nos níveis F1/1,5 e F2,75

6.4. Conclusões/Síntese da Modelação

Do modelo de fácies conclui-se que a litofácies 1 (1a+1b) tem maior representatividade na totalidade da área. É visível no modelo de fácies a complexidade de arquitectura sedimentar dos diversos corpos, podendo-se ver *pinch-outs*, lentículas e diversas variações laterais/interdigitações de fácies.

Ao realizar o modelo a litofácies 1a e litofácies 3 diminuem cerca de 4% e 3% respectivamente em relação às *upscaled Cells* e a litofácies 2 aumenta cerca de 7%. As diferenças de percentagem entre *logs*, *upscaled cells* e modelo são normais de ocorrerem, parte desta variação é devida a *bias* de amostragem (poucos poços na área), e também por vezes devido aos poços não amostrarem todas as litofácies, sendo limitações e incertezas comuns na indústria petrolífera. No caso da litofácies 1a, estas variações podem resultar de pequenas variações de padrões de subsidência ou de taxa de produtividade sedimentar e movimentação de corpos, neste caso mais clásticos (L2) ou biostromas (L3), devido por exemplo a eventos tempestíficos. Esta conclusão é também mencionado em Haase & Aigner (2013), nos estudos sobre um reservatório constituído na sua maioria por carbonatos de textura grainstone nas montanhas de Oman (Khuff sequence KS4), podendo ser considerado um análogo do reservatório em estudo neste trabalho. No caso da litofácies 3, as variações podem ser devidas a estes corpos por vezes terem geometrias lenticulares passando lateralmente muitas vezes à litofácies 2 ou litofácies 1.

Do modelo de porosidade conclui-se que a litofácies 1, em especial a litofácies 1b, possui porosidades maiores, por oposição às litofácies 2/3 que exibem os valores mais baixos. Parece por isso haver uma relação entre porosidade e ambiente deposicional, e consequentemente com a litofácies. Uma vez que a maioria dos níveis segundo Ahr (2008) se classificam como reservatórios híbridos 1 ou diagenéticos, conclui-se que a litofácies 1, nomeadamente os níveis depositados em meios mais energéticos (*upper shoreface*) sofreram processos diagenéticos que geraram maior porosidade (dissolução) ao invés das litofácies 2/3 (depositadas em *lower shoreface* ou *offshore*) que sofreram maior cimentação.

7. Discussão e conclusões

7.1 Discussão dos resultados

No geral, o afloramento em estudo, de idade batoniana (Batoniano inferior) faz parte de um cortejo de *Lowstand* (*LST*), caracterizado por conjuntos de parasequências de progradação para aggradação (Fig. 3.6.), e corresponde ao início de um sub-ciclo transgressivo (ciclo de fácies transgressivas-regressivas de 2ª ordem – Fig. 3.8). As litofácies presentes são de ambiente de barreira (face de praia e praia s.s - Litofácies 1), e de barreira interna/intermédia, ou seja de transição *offshore*/face de praia (Litofácies 2-3). O afloramento tem expressão cíclica (ciclos elementares) entre estes três tipos de litofácies, sendo por vezes difícil definir correctamente a litofácies em zonas de transição; isto é especialmente verdade para a litofácies 3 que por vezes se vai tornando mais oolítica no limiar com as outras litofácies (1 e 2) ou até mesmo entre os biostromas (lateralmente), apresentando por isso por vezes texturas rudstone (lâminas B1,B4,D5, F3,G2) ou até mesmo grainstones (lâminas B2, F2,F2,5).

No modelo de fácies obtido através do Petrel observam-se múltiplas variações laterais de fácies. Inicialmente utilizou-se como *input* a informação retirada no afloramento (Poços A2, A, B, CDE, FG, FG2, F3) incluindo as diversas variações laterais ou *pinch outs* observados, ao construir o modelo essa informação foi estendida ao resto da área. O resultado obtido no modelo reproduz e honra a informação de campo, no entanto, existe a limitação inerente ao volume de dados, que em trabalhos futuros deverá ser maior, para haver maior certeza e controlo da área.

Observando-se a tabela (Tab. 5.1) que mostra os valores de porosidade obtidos através do ensaio de imersão em água e a porosidade estimada ao microscópio, verifica-se que esta última na maior parte das amostras é semelhante à obtida no ensaio, com apenas variações de 1-2%. Estas variações podem ser meramente um erro de estimativa visual ou devido à porosidade observada na lâmina poder não estar conectada com a superfície tridimensional e por isso não ser contabilizada no ensaio de porosidade que apenas contabiliza a porosidade efectiva.

No entanto algumas dessas amostras têm uma variação grande, em especial a amostra D5 que se estimou ter mais 5% de porosidade do que a obtida no ensaio; este facto pode ser explicado provavelmente por esta porosidade do tipo *vug* estar associada a bioclastos (Fig.5.66) que

poderiam não estar presentes nas taliscas utilizadas para realizar o ensaio de porosidade. Observando a amostra de mão do nível D5 (Fig. 5.66 A) pode-se observar que há uma grande heterogeneidade, havendo zonas com muitos bioclastos mas também zonas mais oolíticas. Os poros da lâmina D5 têm dimensões superiores a 0,5mm sendo por isso classificados em mesoporos grandes (*large*) segundo Choquette & Pray (1970), e aparentam estar conectados, fazendo com que este nível possa ter algum potencial como reservatório.

Outras amostras com uma variação de 3-4% a menos do valor obtido pelo ensaio, são as amostras F3 e E1; nestas lâminas a porosidade é grandemente intrapartícula, no entanto como os oóides se encontram por vezes micritizados isso torna a coloração azul dos poros difícil de ver, o que poderá explicar essa diferença, ou corresponder a heterogeneidades dentro do nível.

Os valores de porosidade obtidos através do porosímetro de expansão de gás Hélio (Tab. 5.2) deram também valores distintos de porosidade em alguns dos níveis (F1, F2, E1 e E2), podendo ter sido devido a: i) heterogeneidade vertical dentro das camadas, devido à acção diferenciada da diagénese levando, por exemplo, à presença de estilólitos (aumento da ϕ e k), ou a maior impacte da cimentação (diminuição da ϕ e k); ii) dimensão das taliscas/plugs pois, tal como Borgomano *et al.* (2013) referem no seu trabalho, a pequena dimensão de amostragem pode não ser representativa das propriedades intrínsecas da rocha, conhecido como “efeito de suporte” (*Support effect*) relativamente à rocha e estruturas porosas; assim, por exemplo se uma talisca incluir um estilólito, mas o Plug não incluir esse tipo de estrutura, pode existir um desfasamento de resultados.

Nas lâminas observadas a maior parte da porosidade é intrapartícula, intercrystal e interpartícula; mais raramente observa-se porosidade móldica, *vug*, fenestrada e de canal associada a estilólitos (Fig. 5.80). É de notar que as proporções dos tipos de poros oscilam um pouco consoante a litofácies, desta forma, a litofácies 1a e litofácies 3 têm porosidade maioritariamente do tipo intrapartícula, interpartícula e intercrystal; a litofácies 1b tem porosidade maioritariamente do tipo intrapartícula e de canal e a litofácies 2 tem maioritariamente porosidade do tipo intrapartícula, fenestrada e intercrystal. Os processos diagenéticos que mais afectaram estas rochas foram a cimentação, dissolução e compacção.

Os maiores valores de porosidade efectiva encontram-se associados à litofácies 1 (Tab. 5.3), calcários mais oolíticos, formados em ambientes *shoreface*. Em especial a litofácies 1b que se

encontra por vezes no topo dos níveis oolíticos L1a (Observado em E1 e F2,75). Por vezes na L1a, existem níveis com porosidade muito baixa (nível 2, D1 – níveis mais finos; nível B3, G1-recristalização elevada). A litofácies 3 apresenta em média valores de porosidade muito semelhantes aos da litofácies 1a, evidenciando alguns níveis com porosidade moderada (ver ponto 5.6). Muitos desses valores estão associados a amostras (taliscas/lâminas) oolíticas de textura grainstone correspondendo à matriz dos níveis biostromas (ex: F2, F2,5 e F3).

Dos níveis em estudo a maior parte classificam-se como reservatórios híbrido 1, tendo tanta influência deposicional quanto diagenética, ou diagenéticos quando a influência diagenética foi bastante superior à deposicional.

A imagem abaixo (Fig. 7.1) relaciona a litofácies com as oscilações de alta frequência do nível do mar (ciclos-elementares), e com as respectivas porosidades associadas. Inseriu-se também as *layers* do modelo de porosidades das camadas com valores mais elevados e o tipo de porosidade que se pensa ser a mais representativa desses níveis e a estimativa da permeabilidade.

Em termos de permeabilidade como já foi dito, esta relaciona-se com o tipo, geometria e tamanho dos poros. Porosidades interpartícula, intercrystal e de canal deverão estar associadas a permeabilidades mais elevadas do que as que estarão associadas a porosidades do tipo intrapartícula, moldada ou *vug*. A permeabilidade será também maior em poros maiores (mesoporos grandes e megaporos) e mais conectados entre si.

Observando esta figura verifica-se que a camada D3 teria valores mais elevados de permeabilidade. Numa das lâminas deste nível observam-se estilólitos que sofreram uma dissolução tardia gerando porosidade de canal (megaporo) com boa conexão. Apesar de na outra lâmina - D3 (A), não estarem presentes estilólitos e a porosidade ser bastante mais baixa, neste nível foram vistos estilólitos em patamar (Fig. 5.23) e prevê-se que existam diversos estilólitos como estes presentes na camada, tendo por isso o maior potencial como reservatório.

A camada E1, apresenta níveis elevados de porosidade no topo tendo sido, no entanto, obtidos valores de porosidade bastante mais baixos no Plug retirado poucos centímetros abaixo da zona de porosidade elevada; a porosidade é na sua maioria intrapartícula (microporos) associada a oóides e bioclastos, porosidade moldada (mesoporos pequenos - 0,1 a 0,5 mm) e porosidade

interpartícula associada a estilólitos (mesoporos pequenos) não estando conectados. Prevê-se que todo o nível tenha baixa permeabilidade, semelhante ao valor obtido no plug.

A camada E2 revelou ter porosidades moderadas nos plugs (5-6%) tendo num desses plugs sido obtida uma permeabilidade boa (~160 mD), o que pode ser explicado por produtos diagenéticos como porosidade de canal gerada por compactação/dissolução (Ver lâmina E2- Fig. 5.69) ou por fracturação, o que faz deste nível também um reservatório razoável.

As camadas oolíticas do sector F, que apresentam porosidades entre 3,5-8% (baixa a moderada), sofreram alguma dolomitização sendo os principais tipos de porosidade intrapartícula, intercristal e interpartícula e de canal associada a estilólitos. Na lâmina F1,5 os poros parecem ser todos de dimensão pequena (microporos e mesoporos inferiores a 0,5 mm) e pouco conectados devendo ter valores de permeabilidade também baixos, semelhantes aos obtidos nos plugs F1 e F2. Na lâmina F2,75 além da porosidade intrapartícula observa-se porosidade de canal associada a um estilólito que atravessa toda a lâmina, devendo os fluidos percolar facilmente (elevada permeabilidade). Os valores de permeabilidade deverão ser neste nível semelhantes aos de E2, ou possivelmente superiores, visto que apesar de este canal ser bastante fino é menos tortuoso do que os observados em E2.

O modelo de fácies, após concluído, serviu como *trend* e controlo geológico para o modelo de porosidade. É possível observar a variação lateral e vertical da porosidade entre as diferentes litofácies, e também dentro da mesma litofácies; tal heterogeneidade resulta da variação de intensidade dos processos diagenéticos (diagénese mais ou menos pervasiva). Desta forma os modelos têm em maior consideração o modelo geológico e também algumas das incertezas associadas.

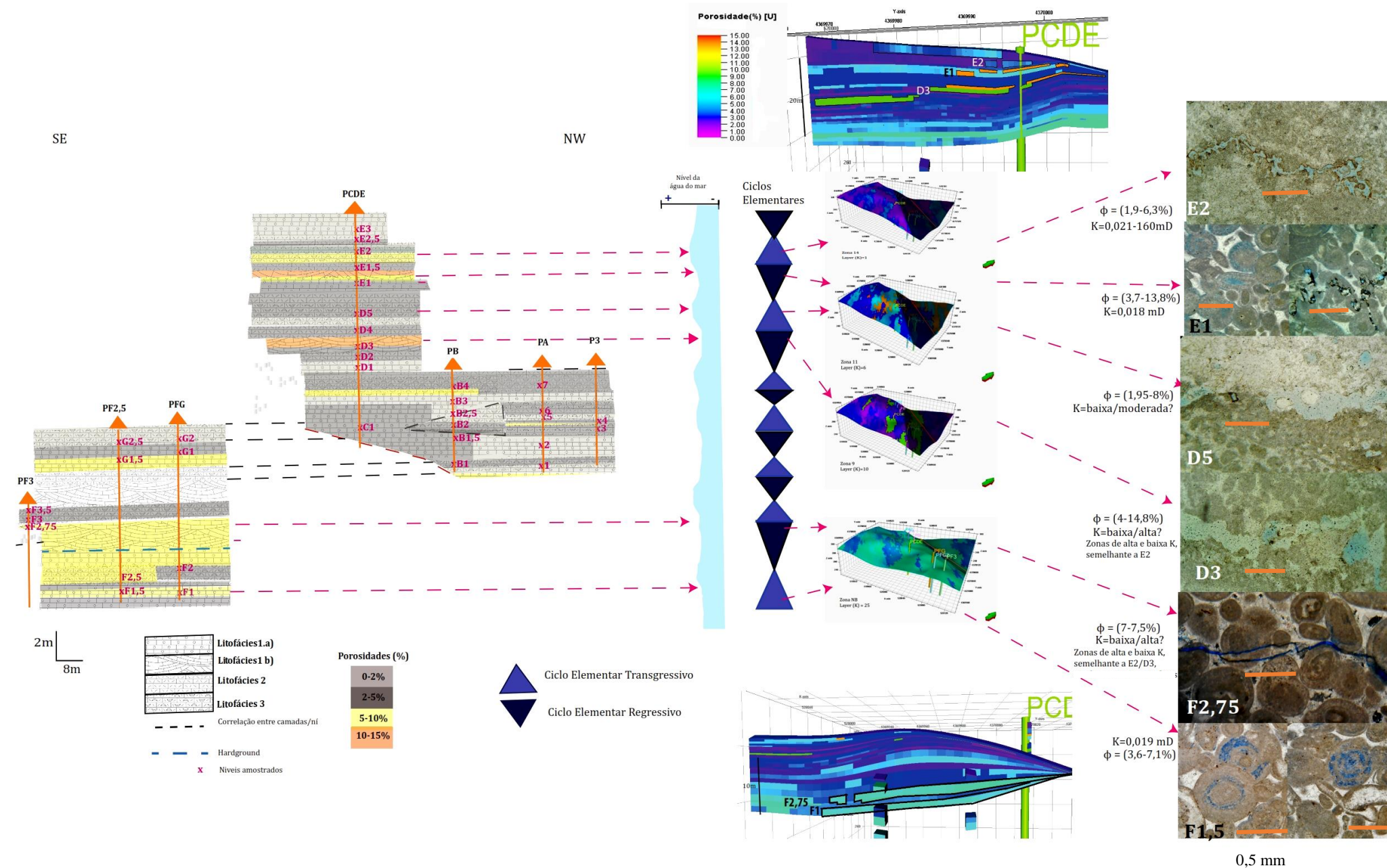


Fig. 7.1. – Esquema das propriedades petrofísicas do reservatório, mostrando a relação da fácies com ciclos elementares e porosidade, e permeabilidade expectável nos níveis mais porosos.

A cerca de 9 km a Norte do afloramento do Vale Florido, na região do Codaçal, observam-se fácies de ambiente *shoreface* superior que correspondem também a calcários oolíticos (litofácies 1) por vezes calciclásticos (litofácies 2) ou dolomitizados (litofácies 11), sendo também de idade batoniana. Em certos intervalos da sucessão de Codaçal, é visível maior porosidade, sendo esta de diversos tipos, nomeadamente de fractura, intrapartícula, interpartícula, *vug*, moldada e intercrystalina (Azerêdo 1993, 2013, 2015; Pimentel, 2005; Inês, 2010), os poros são também de maior dimensão e possivelmente teriam também permeabilidade mais elevadas do que no afloramento em estudo o que mostra que numa curta distância podem existir melhores reservatórios em calcários em tudo semelhantes (grande heterogeneidade e impacte diferencial da diagénese).

7.2 Conclusões

Os reservatórios carbonatados são altamente complexos devido às condições deposicionais e aos processos diagenéticos que actuam sobre eles. A diagénese leva muitas vezes a heterogeneidades a nível da porosidade e permeabilidade ao longo das bacias sedimentares.

O conjunto do afloramento em estudo corresponde a um reservatório *tight*, isto é, um reservatório com permeabilidade muito reduzida, sendo a porosidade no seu geral baixa também (em média, cerca de 3,5%). O reservatório foi grandemente afectado pela diagénese, podendo algumas das camadas ser classificadas como reservatórios híbrido 1 ou reservatórios diagenéticos. A diagénese afectou negativamente grande parte do reservatório, havendo diversas fases de cimentação. Conclui-se desta análise de resultados que os melhores níveis de porosidade se encontram associados a níveis oolíticos (Litofácies 1 – em especial L1b) e em termos de permeabilidade se encontram em níveis que sofreram dissolução acentuada por compactação mecânica e química com geração de estruturas como sejam estilólitos, formando canais de alta permeabilidade ou níveis fracturados. A importância das zonas de estilólitos, já foi previamente descrita por Shekhar *et al.* (2014), como sendo das estruturas que mais influenciam o fluxo (*flow*) e consequentemente a permeabilidade. Assim, os níveis com maior potencial de reservatório serão o nível D3, E2 e F2,75 e possivelmente D5, onde em lâmina se consegue observar poros *vug* de dimensão razoável parecendo estar conectados.

Normalmente os *workflow* dos modelos de fácies e propriedades (ϕ e K) dependem muito de propagação geostatística dos dados de poços, muitas vezes sem honrar modelos geológicos conceptuais. Com este estudo pretendeu-se integrar a informação recolhida no campo, em especial a arquitectura e geometria dos *geobodies*, e a observação petrográfica complementar (para uma melhor análise litológica e também das propriedades do reservatório) e modelá-la demonstrando a importância que o conhecimento geológico tem na obtenção de um modelo conceptual com maior semelhança à realidade observada.

O modelo de fácies permitiu visualizar no espaço as diversas interdigitações/variações laterais de fácies bem como potenciais armadilhas estratigráficas. O modelo de porosidades permite também estudar e avaliar a propagação das porosidades obtidas além do afloramento.

Não foi possível realizar *Reservoir Rock Typing* (RRT), uma vez que os valores de permeabilidade obtidas eram na sua grande maioria muito baixos e apresentavam uma relação com porosidade muito fraca, isto é, apesar da porosidade aumentar a permeabilidade não aumenta, mantendo-se reduzida. Tal deve-se ao impacte da diagénese, nomeadamente da cimentação.

A caracterização deste reservatório poderia ser melhorada através de um maior volume de dados de permeabilidade, apesar de em grande parte das amostras/lâminas delgadas ser observável que os poros são pouco conectados assumindo-se que iriam ter permeabilidades baixas; podendo no entanto haver excepções. E, ainda, por complementação da informação geológica com informação petrofísica de *logs* (dados contínuos), nomeadamente NMR (cálculo de porosidade efectiva e determinação da distribuição do tamanho dos poros, detecção da permeabilidade), resistividade (detecção de anisotropias), sónico (cálculo de porosidades), DSI (detecção de anisotropias, caracterização semiquantitativa da permeabilidade), entre outros.

8. Bibliografia

- Adams, A.E., Mackenzie, W. S. & Guilford, C. (1984) – Atlas of sedimentary rocks under the microscope. *Prentice Hall*, pp. 33-75.
- Ahr, W. (2008). Geology of Carbonate Reservoirs - The Identification , Description , and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks. . *A John Wiley & Sons, inc., Publication, USA*, 269 pp.
- Akbar, M., Petricola, M., Watfa, M., Badri, M., Charara, M., Boyd, A., Cassell, B.; Nurmy, R.; Delhomme, J.P.; Grace, M.; Kenyon, B.; Roestenburg, J. (January 1995). Classic Interpretation Problems: Evaluating Carbonates. *Oilfield Review. Schlumberger*, pp. 38-57.
- Al-Hajeri, M. M., Saeed, M. A., Derks, J., Fuchs, T., Hantschel, T., Kauerauf, A., Neumaier, M., Schenk, O., Swientek, O., Tessen, N., Welte, D., Wygrala, B., Kornpihl, D. & Peters, K. (2009). Basin and Petroleum System Modeling. *Oilfield Review* 21, no. 2, pp 14-29.
- Ali, S., Clark, W., Moore, W., & Dribus, J. (2010). Diagenesis and Reservoir Quality. *Oilfield Review, Schlumberger*, pp. 14-27.
- Archie, G. E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *AAPG Bulletin* 36, pp. 278-298.
- Asquith, G., & Krygowski, D. (2004). Basic Well Log Analysis. *AAPG Methods in Exploration Series. (16)* , pp. 240-244.
- Azerêdo, A. C. (1993). Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica): análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia. Tese de Doutorado (*não publ.*), Departamento de Geologia, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, Portugal, 366 p. , 36 ests. (2 vol.).
- Azerêdo, A. C. (1998). Geometry and facies dynamics of Middle Jurassic carbonate ramp sandbodies, WestCentral Portugal. In: V. P. WRIGHT & T. BURCHETTE (eds), Carbonate Ramps. *Geol. Soc., London, Spec. Publ., 149*, 281-314 p.

- Azerêdo, A. C. (2007). Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas (INETI)* 94, pp. 29-51.
- Azerêdo, A. C. (2013). Middle Jurassic shallow ramp stratigraphy, sedimentary patterns and reservoir features of Jurassic Carbonate sucessions from the Lusitanian Basin. In: Azerêdo A.C. & Duarte L.V., *Guia de campo (Pre-meeting trip – SFT 04) STRATI 2013*, 1st International Congress on Stratigraphy, Lisboa, 1-7 Jul/2013, 31 pp.
- Azerêdo, A.C., Duarte, L.V & Silva, R.L. (2014). Configuração sequencial em ciclos (2^a ordem) de fácies transgressivas-regressivas do Jurássico Inferior e Médio da Bacia Lusitânica (Portugal). *Comunicações Geológicas(LNEG)* 101, pp. 383-386.
- Azerêdo, A. C., Silva, R.L., Duarte, L.V. & Cabral, M.C. (2010). Subtidal stromatolites from the Sinemurian of the Lusitanian Basin (Portugal). *Facies*, 56, pp. 211-230.
- Azerêdo, A. C., Wright, V. P. & Ramalho, M. M. (2002). The Middle-Late Jurassic forced regression and disconformity in central Portugal: eustatic, tectonic and climatic effects on a carbonate ramp system. *Sedimentology*, 49 (6), pp. 1339-1370.
- Berelson, W., Hammond, D., McManus, J., & Kilgore, T. (1994). Dissolution kinetics of calcium carbonate in equatorial Pacific sediments. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, pp. 219-235.
- Borgomano, J., Masse, J.-P., Fenerci-Masse, M. & Fournier, F. (2013). Petrophysics of Lower Cretaceous platform carbonate outcrops in Provence (SE France): implications for carbonate reservoir characterization. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 36(1), pp 5 - 42
- Biddle, K., & Wielchowsky, C. (1994). Hydrocarbon Traps. in: Magoon, L.B. and Dow, W.G., eds., *The Petroleum System-From Source to Trap. AAPG Memoir #60*, pp. 219-236.
- Cabral, J. (2004). Elementos de Geomorfologia. *Edição da Associação de Estudantes da Faculdade de Ciências de Lisboa*, 206 pp.
- Carvalho, J. M. F. (2013). Estrutura do Maciço Calcário Estremenho: evolução tectónica e caracterização dos padrões de fracturação. Tese de Doutoramento, *Universidade de Lisboa*, Lisboa, 443 pp.

- Carvalho, J., Midões, C., Machado, S., Sampaio, J. & Costa e Vitor, A. (2011). Maciço Calcário Estremenho - Caracterização da Situação de Referência. LNEG, relatório interno (não publ.), 42 pp.
- Choquette, F., & Pray, L. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 54, pp. 207-250.
- Corrêa, O. L. (2003). Petróleo - Noções sobre Exploração, Perfuração, Produção e Microbiologia. *Interciência*, Rio de Janeiro, 87 pp.
- Duarte, L., & Soares, A. (2002). Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico Inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Comunicações Instituto Geológico e Mineiro*, 89, pp. 135-154.
- Dunham, R. J. (1962) – Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Classification of carbonate rocks, W. E. Ham (Ed.). *AAPG Memoir No.1*, Tulsa, OK, pp. 108-121
- Embry, A. F. & Klovan, J. E. (1971) – A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bull. Can. Petroleum Geol.* 19, pp. 730-781
- Flügel, E. (1982). Microfacies analysis of limestones. *Springer-Verlag*, Berlin, 633pp.
- Flügel, E. (2004). Microfacies of Carbonate Rocks - Analysis, Interpretation and Application. *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 921 pp.
- Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bull.* 43, pp. 1-38.
- Folk, R. L. (1962). Spectral subdivision of limestones types. In: Classification of carbonate rocks, W. E. Ham (Ed.). *AAPG Memoir No.1*, Tulsa, OK, pp. 62-84.
- Folk, R. L. (1965). Some aspects of recrystallization in ancient limestones. In: Dolomitization and Limestone Diagenesis, L. C. Pray and R. C. Murray, (Eds). *SEPM Special Publication No.13*, pp. 14- 48.

- Franklin, J.A. (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, No.2, pp. 141-156
- Friedman, G. (1965). Terminology of crystallization textures and fabrics in sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Geology*, 35, pp. 643-655.
- Gomes, J., & Alves, F. (2007). O Universo da Indústria Petrolífera - Da Pesquisa à Refinação. *Fundação Calouste Gulbenkian*, 627 pp.
- Gomes, J., Ribeiro, M., Strohmenger, C., Negahban, S., & Kalam, M. Z. (2008). Carbonate Reservoir Rock Typing – The Link between Geology and SCAL. *Society of Petroleum Engineers (SPE 118284)*, pp. 1-14.
- Haase, M., & Aigner, T. (2013). High Resolution anatomy of a grainstone package in Khuff Sequence KS4, Oman Mountains, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, V.18, no.4, pp. 17-44.
- Inês, N. (2010). Paleotipologias diagenéticas em formação carbonatadas do Jurássico Médio da Bacia Lusitânica: análise multiscala e aplicações à caracterização de reservatórios. Tese de Mestrado (não publ.). Departamento de Geologia, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, Portugal, 204 pp.
- Inês, N., Azerêdo, A., Bizarro, P., Ribeiro, T., & Nagah, A. (2012). A Diagenetic Diagram as a Tool for Systematic Detailed Characterization of Carbonate Rocks: Applications to the Diagenetic Evolution of Hydrocarbon Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers, SPE 161040*, 19 pp.
- James, N., & Choquette, P. (1990). Limestones - The sea-floor diagenetic environment. *Geoscience Canada, Volume 10, n°4*, pp. 162-179.
- Jordan, C., & Wilson, J. (1994). Carbonate Reservoir Rocks. In Magoon, L.B. & Dow, W.G. (eds.): The petroleum system – from source to trap, *AAPG Memoir #60*, pp.141-157.
- Kendall, C. G. St. C. (2005). Classificação de Folk (1959,1962). Acedido a 17 de Dezembro de 2015. Disponível em < <http://www.sepmstrata.org/page.aspx?pageid=89>>

- Killops, S., & Killops, V. (1993). An introduction to organic geochemistry. *Longman Scientific and Technical*, US. XI + 265 pp.
- Kullberg, J. C. R. (2000). Evolução Tectónica Mesozóica da Bacia Lusitaniana. Tese de Doutoramento, *Universidade Nova de Lisboa*, Lisboa, 361 pp.
- Kullberg, J. C., Rocha, R., Soares, A., Rey, J., Terrinha, P., Callapez, P. & Martins, L. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. & Kullberg, J.C) Eds. *Univ. Évora*, pp. 317-368.
- Kullberg, J., Terrinha, P., & Kullberg, M. (1997). Tectonic Evolution of the Lusitanian Basin to the South of the Nazaré Fault during the Mesozoic. *Grupo de Geologia Estrutural e Tectónica*, 49-58 pp.
- Lucia, F. (1999). Carbonate Reservoir Characterization. *Springer-Verlag*, Berlin, 226 pp.
- Machel, H. & Mountjoy E.W.(1986). Chemistry and environments of dolomitization - a reapraisal. *Earth Sciences Rev.*, 23, pp. 175-222.
- Macintyre, G. I., Prufert-Bebout, L., & Reid, R. P. (2000). The role of endolithic cyanobacteria in the formation of lithified laminae in Bahamian stromatolites. *Sedimentology*, 47, pp. 915-921.
- Mackenzie, A. S., & Quigley, T. M. (1988). Principles of geochemical prospect appraisal. *American Association of Petroleum Geologists, Bull.* 72, pp. 399-415.
- Mackenzie, W.S. & Adams, A.E. (1994) – A Colour Atlas of Rocks and Minerals in Thin Section. *Manson Publishing*, England, pp. 126-139
- Mansurbeg, H. (2001). Modelling of reservoir quality in quartz-rich sandstone of the Lower Cretaceous Bentheim sandstones, Lower Saxony Basin, Nw Germany. *Examensarbeten i Geologi vid Lunds Universitet, Historik Geologi och Paleontologi* Nr 143, pp. 1-35.
- Manuppella, G.; Antunes, M. T.; Almeida, C.; Azerêdo, A. C.; Barbosa, B.; Cardoso, J. L.; Crispim, J. A.; Duarte, L. V.; Martins, L. T.; Ramalho, M. M.; Santos, V. F. & Terrinha, P. (2000). Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém. *Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 155 pp.

- Manuppella, G. & Costa, G. J. & (1985). Calcários e Dolomitos do Maciço Calcário Estremenho. *Estudos Notas e Trabalhos, S.F.M*, 27, pp. 3-48.
- Mazzullo, S. (2004). Overview of Porosity Evolution in Carbonate Reservoirs. *Kansas Geological Society Bulletin*, v. 79, pp. 22-28.
- Montaron, B. (2005). "Increasing Oil Recovery Factors: A Technical Challenge Key to Future World Energy Supply". *AFTP Conference*. Paris.
- Moore, C. (2001). Carbonate Reservoirs. Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. *Elsevier*, 444 pp.
- Morrow, D. (1982). Diagenesis I. Dolomite - Part I. The chemistry of dolomitization and dolomite precipitation. *Geoscience Canada*, 9/2, pp. 95-107.
- Morse, J., & Mackenzie, F. (1990). Geochemistry of Sedimentary Carbonates. Developments in sedimentology, 48. *Elsevier Scientific Publ. Co.* New York, 707 pp.
- Murray, R.C. & Lucia F.J. (1967). Cause and control of dolomite distribution by rock selectivity. *Geological Society of America Bulletin*, 78, pp. 21-35.
- Nurmi, R. & Standen, E. (1997). Carbonates, the inside story. *Middle East Well Evaluation Review*, 18, pp.28-41.
- Pimentel, P. (2005). Paleodescontinuidades e assinaturas diagenéticas: caracterização e utilidade como marcadores do Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho. Tese de Mestrado (não publ.). Departamento de Geologia, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, Portugal, 155 pp.
- Pinheiro, L. M.; Wilson, R. C. L.; Pena Dos Reis, R.; Whitmarsh, R. B. & Ribeiro, A., 1996. The western Iberia margin: a geophysical and geological overview. In: Pinheiro, L. M. et al. (Editors), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, pp. 1-23
- Pittman, E. (1992). Relationship of Porosity and Permeability to Various Parameters Derived from Mercury Injection-Capillary Pressure Curves for Sandstone. *AAPG Bull.*, Vol 76, No.2, pp. 191-198.

- Rasmussen, E., Lomholt, S., Anderson, C. & Vejbaek, O. (1998) – Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. *Tectonophysics*, 300, pp. 199-225.
- Reid, R., & Macintyre, I. (2000). Microboring versus recrystallization: Further insight into the micritization process. *Journal of Sedimentary Research*, 70, pp. 24-28.
- Rezaee, M., & Lemon, N. (1996). Controls on pore geometry in Tirrawarra sandstone reservoir, Cooper Basin, Australia. *Petroleum Exploration Society of Australia*, 24, pp. 125-146.
- Ribeiro, A., Silva, J. B., Cabral, J., Dias, R., Fonseca, P., Kullberg, M. C., Terrinha, P. & Kullberg, J. C., (1996). Tectonics of the Lusitanian Basin. Final Report, Proj. MILUPOBAS, Contract nº JOU-CT94-0348, ICTE/GG/GeoFCUL; 126 p., Lisboa.
- Schlumberger market analysis*, 2007 e *BP statistical review*, 2007. Acedido a 17 de Dezembro de 2015. Disponível em
<http://www.slb.com/~media/Files/industry_challenges/carbonates/brochures/cb_carbonate_reservoirs_07os003.pdf>
- Schwartz, L. M., & Banavar, J. R. (1989). Transport properties of disordered continuum systems. *Phys. Rev., B*, 39, pp. 11965-11969.
- Shekhar, R., Sahni, I., Benson, G., Agar, S., Amour, F., Tomás, S., Christ, N., Always, R., Mutti, M., Immenhauser, A., Karcz, Z. & Kabiri, L. (2014). Modelling and simulation of a Jurassic carbonate ramp outcrop, Amellago, High Atlas Mountains, Morocco. *Petroleum Geoscience*, Vol. 20, pp. 109-123.
- Sibley, D. F. (1982). The origin of common dolomite fabrics, clues from the Pliocene. *Jour.Sed. Petrol*, 52, pp. 1087-1100.
- Sousa, A., Inês, N., Bizarro, P. & Ribeiro, M.T. (2014). Improving Carbonate Reservoir Characterization and Modeling through the Definition of Reservoir Rock Types by Integrating Depositional and Diagenetic Trends. *Society of Petroleum Engineers (SPE-171920-MS)*, pp. 1-33.
- Steinsund, P. & Hald, M. (1994). Recent carbonate dissolution in the Barents Sea: Paleoceanographic applications. *Marine Geology*, 117, pp. 303-316.

- Swei, G. & Tucker, M. (2012). Impact of diagenesis Reservoir Quality in Ramp Carbonates: Gialo Formation (Middle Eocene), Sirt Basin, Libya. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 35(1). pp 25-48.
- Thomas, J. (2001). Fundamentos da engenharia do petróleo. *Editora Interciência*, Rio de Janeiro. 269 pp.
- Tucker, M. (1981). Sedimentary Petrology. *Blackwell Science*, Oxford. 262 pp.
- Tucker, M. (1988). Techniques in Sedimentology. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, 394 pp.
- Tucker, M. (1990). Diagenetic processes, products and environments. In: Tucker, M. & Wright, V. P. (eds), Carbonate Sedimentology. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, pp. 314-364
- Tucker, M., & Wright, V. (1990). Carbonate Sedimentology. *Blackwell Scientific*, Oxford, 482pp.
- Varol, B., & Magaritz, M. (1991). Dolomitization, time boundaries and unconformities: Examples from dolostone of the Taurus Mesozoic sequence, south-central Turkey. *Sedimentology Geology. Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam, pp. 117-133.
- Volery, C., Davaud, E., Foubert, A., & Caline, B. (2009). Shallow-marine microporous carbonate reservoir rocks in the Middle East: Relationship with seawater Mg/Ca ratio and eustatic sea level. *Journal of Petroleum Geology*, 32, pp. 313-326.
- Watkinson, M. (1989). Triassic to Middle Jurassic sequences from the Lusitanian Basin Portugal, and their equivalents in other North Atlantic margin basins. Unpublished PhD Thesis, Open University, Milton Keynes, U.K., 390 pp.
- Wilson, R. (1988). Mesozoic development of the Lusitanian Basin, Portugal. *REv. Soc. Geol. Española*, 1(3-4), pp. 393-407.

- Wright, V. P. (1991). Paleokarst: types, recognition, controls and associations. in Paleokarsts and paleokarstic reservoirs, eds. Wright V.P; Esteban, M & Smart, P.L. *Postgraduate Research Institute for Sedimentology, University of Reading Contribution 152*, pp. 56-88.
- Wright, V. P. (1992) – A revised classification of limestones. *Sedimentary Geology*, 76, pp. 177-185.
- Wright, V. P.(2002a). Applied Carbonate Geology: Carbonate Facies and Reservoirs. *Nautilus, Ltd.* (não publ.), 440 pp.
- Wright, V.P. (2002b). Dissolution and porosity development in carbonates. In: Evolution of Karst: From PreKarst to Cessation.. *Ljubljana-Postojna*, pp. 13-20.

Anexos

Procedimento do Porosímetro por expansão de gás Hélio (no equipamento da Vinci):

- Secar o Plug numa estufa a 85°C no mínimo de 3h
- Medir o comprimento e diâmetro utilizando o Vernier Caliper digital e obter o Vbulk (em cm³)
- Para a matriz, 4 acções são seleccionadas: i) medir o volume de grãos; ii) medir a pressão atmosférica do laboratório; iii) realizar uma calibração *standart*; iv) e redefinir a calibração do sistema se necessário.
- Manter sempre a temperatura estável
- Abrir os cilindros fornecidos de gás Hélio e ar comprimido e usar os seus reguladores de pressão de dupla fase para definir ambas as pressões de gás que vai ser fornecido ao porosímetro (Fig. 1).
- Ligar o porosímetro e o computador e deixar aquecer durante 30 mins. ou até a temperatura se tornar estável
- Abrir a matriz, desaparafusando (no sentido contrário aos ponteiros do relógio) a escotilha superior. De seguida, retire o copo matriz de metal da estrutura. Certifique-se de que não existem partículas de areia na parte superior do copo de matriz.
- Segurar o copo matriz num ângulo de 45 ° e deslizar o Plug para não partir ou fracturar a amostra. Registar o número dos packouts/embalagens que foram utilizados (Fig. 2) – estas embalagens não podem ser utilizadas entre os dois porosímetros.
- Actualizar a página da amostra (Fig. 3), com as dimensões (em mm) e massa seca (em g) e verificar se está na opção “ Plug cilíndrico”
- Iniciar o software VINCI AppliLab
- Actualizar a pressão atmosférica clickando no “Start”. As válvulas são operadas automaticamente para ventilar o sistema para a atmosfera e serão fechadas de seguida. Confirmar o processo de iniciar (Start) clickando YES , ou abortar clickando NO. Após cerca de 10 segundos, é realizado o contrabalanço (*offset*) da pressão. Verificar com cuidado este passo, Todos os cálculos são baseados neste valor e um erro distorce todos os resultados.
- Verificar a calibração (ao fim de cerca de 10 amostras)
- Medir o volume de grãos (Vg). Nota: não pode ser medido em amostras não consolidadas, esse tipo de amostras precisam de um revestimento.
- Seleccionar o tipo de matriz, certificando-se que é copo matriz porosidade ambiente (*ambient porosity matrix cup*).
- Seleccionar “medir” (*measure*) e clicar no *Start*. Seguir os passos do software, para executar uma medição do Vg passo a passo. (Fig. 4)
- Guardar todos os dados na folha de registo de dados em anexo, que ficarão guardados numa pasta designada “ficheiros de excel” (*excel files*)

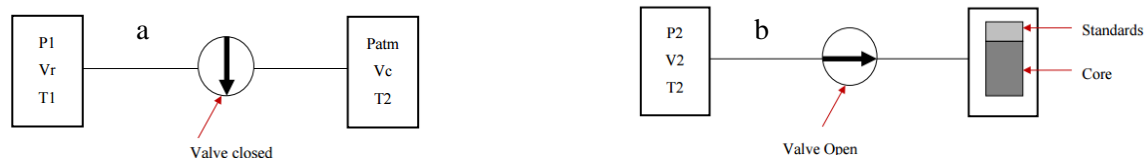


Fig. 1– a) gás He no volume de referência; b) gás He expandido para um copo matriz com um plug (Core) e padrões (*standards*)

Packouts Serial No.	Volume (cc)
1	2.707
2	2.714
3	5.428
4	10.885
5	21.750
6	43.479

Fig. 2– *Packouts* (embalagens)

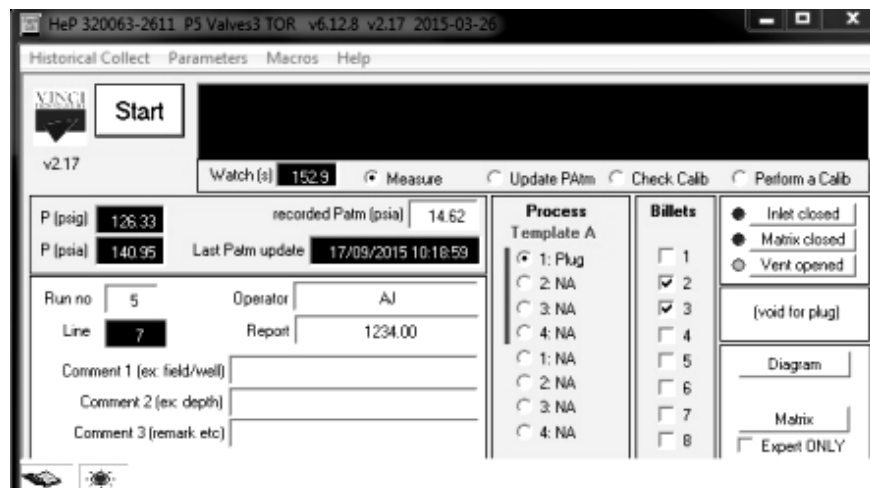


Fig. 3– *AppliLab Software* - janela das propriedades da amostra

Screenshot of the 'Sample' window in AppliLab Software showing fields for Sample number, Line, Sample name, Sample dia (mm), Sample length (mm), Sample bulk (ml), Sample weight (g), and Stability required parameters.

Fig. 4– *AppliLab Software* – Janela das medições do V_g

Procedimento do Permeâmetro Digital (Utilizando o equipamento Gasperm da Vinci):

- Limpar e secar uma amostra *core*, de arenito Berea (1,5cm diâmetro e 3cm comprimento cilíndrica), retira-se as dimensões utilizando o Vernier Caliper digital e de seguida liga-se o permeâmetro de gás Hélio deixando ficar a aquecer durante 30 mins.
- Verificar se a válvula de amostra está desligada, e a válvula de pressão confinante está no sentido da ventilação (*Vent*).
- Abrir a válvula do cilindro de gás ar comprimido e usar o regulador de duplo estágio para o deixar fornecer uma pressão confinante (pressão aplicada na manga de suporte do *core*) de 400 psi.
- Regular o cilindro de gás azoto de modo a que o gás azoto flua através da amostra segundo a orientação instruída.
- Desapertar (abrir) completamente no sentido dos ponteiros do relógio a extremidade inferior do suporte do gás enroscado e puxar a peça final toda para baixo.
- Soltar a parte superior, virando algumas vezes no sentido contrário ao ponteiro dos relógios.
- Colocar a amostra *core* em cima da peça de extremidade inferior, orientar a amostra e a peça para cima (*upwards*) e dentro do suporte do *core*, de seguida torcer a peça da extremidade inferior no sentido dos ponteiros do relógio até estar segura.
- Apertar (Fechar) a parte superior da peça da extremidade inferior enroscada até sentir contacto com a amostra/*core*. Apertar demasiado pode quebrar ou danificar a amostra, em especial se esta estiver mal consolidada.
- Iniciar o *Applilab software*, e seleccionar a opção “Update Patm”. De seguida, como um passo de calibração, carregue qualquer plug de calibração de aço inoxidável, para o suporte do plug, dentro dos 5 intervalos ilustrados na figura (Fig. 5)
- Virar a válvula de pressão confinante da posição de ventilação (VENT) para pressão (PRESSURE) e monitorizar a pressão no medidor de pressão confinante.
- Anotar a pressão confinante aplicada na amostra
- Pôr a pressão de retorno (back pressure) em pressão atmosférica pondo a saída na posição para cima.
- Clickar no botão iniciar (Start), e deixar o sistema determinar a Kg (permeabilidade do gás) para a amostra Plug SS calibrada (Fig. 5 /6).
- Assim que a calibração do Plug SS passe no teste, retirar o Plug do suporte *core* rodando a valva de pressão confinante da posição pressão (PRESSURE) para ventilação (VENT) e amostragem de ON para OFF.
- Colocar o Plug em estudo, e certificar que as “tampas” nas extremidades estão a tocar na amostra. Se houver espaço entre a amostra e as tampas nas extremidades, pode explodir/estourar devido à pressão confinante.
- Repetir o procedimento, isto é, voltar a por a válvula da posição de ventilação para pressão, monitorizar a pressão no monitor de pressão confinante e colocar a pressão de retorno em pressão atmosférica
- Seleccionar “Kg auto-flow” na janela principal, e adicionar detalhes da amostra (nome, dimensão, a que poço pertence, etc). (Fig.7)
- Clicar iniciar (start) e a medição inicia-se imediatamente.
- Verificar quando a pressão estabiliza. Uma vez que este método se baseia na Lei de Charles, a pressão tem de estar estabilizada para se calcular a permeabilidade
- Para remover a amostra Plug: Desligar as medições no software, pôr a valvula na posição *off*; libertar a pressão confinante mudando de pressão para ventilação; desapertar o parafuso de ajuste ligeiramente girando no sentido contrário aos ponteiros do relógio (1/4 de uma volta), e puxe para trás o tubo de ligação SS da face do *core*; e finalmente, puxar o anel serrilhado exterior, em seguida, girar um quarto de volta até que a placa final seja libertada. A ponta de libertação rápida deve ser removida facilmente, no entanto, se o plug não sair na placa inferior, deve-se gentilmente empurrar a placa superior até o plug sair.

Fig.5– AppliLab – janela principal para as medições da permeabilidade em gás.

Fig. 6–Plugs SS de calibração com diferentes intervalos de permeabilidade.

Fig. 7– Propriedades da amostra e selecção do Kg – janela do *AppliLab*